VIBRACIONES CAUSADAS POR ACTIVIDAD HUMANA: caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil

JUAN MANUEL BENJUMEA CADAVID

Universidad del Valle
Facultad de Ingenierías
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Santiago de Cali
2003

VIBRACIONES CAUSADAS POR ACTIVIDAD HUMANA
Caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil

JUAN MANUEL BENJUMEA CADAVID

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Civil

Director: Prof. HANSJÜRGEN MEYER
M.Sc. en Geofísica

Universidad del Valle
Facultad de Ingenierías
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Santiago de Cali
2003

Nota de Aceptación:

Prof. HANSJÜRGEN MEYER M.Sc. en Geofísica
Director

Prof. PETER THOMSON Ph.D. en Ingeniería Aeroespacial
Jurado

Prof. HAROLD CÁRDENAS M.Sc. en Ingeniería Estructural
Jurado

Santiago de Cali, 3 de diciembre de 2003

AGRADECIMIENTOS

Al Prof. Hansjürgen Meyer, director de este proyecto, y a PhD. Jorge Mejía (Observatorio Sismológico del SurOccidente), quienes apoyaron y aportaron tiempo para discusiones y correcciones de este proyecto.

A Cementos del Valle, por medio del Ing. Carlos Aramburo (Intendente Cementos del Valle) quien proporciono recursos para la adquisición de los equipos utilizados en este trabajo. A Ing. Juan Carlos Pinzón, Ing. Martin Monsalve, Ing. Omar Giraldo, Téc. Beatriz Valencia y otros más de la Mina La Calera, quienes proveyeron información para la elaboración de este proyecto.

Y a todas aquellas personas que en una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto.

RESUMEN

Las vibraciones causadas por actividad humana han venido cobrando importancia a medida que las fuentes generadoras de tales vibraciones aumentan en cantidad, magnitud y cercanía a zonas pobladas. Cementos del Valle en la mina La Calera, dedicada a la extracción de caliza para la fabricación de cemento, realiza alrededor de dos voladuras diarias con este fin. Para evaluar los efectos de las vibraciones producidas por estas voladuras se instalaron estaciones de monitoreo en las poblaciones de San Marcos y Mulaló, de las cuales se obtuvieron 504 registros de vibraciones durante el periodo comprendido entre mayo 1999 y agosto 2002.

Los resultados obtenidos debían tener un punto de comparación, el cual no existe en Colombia. Por tanto, se hizo necesario adquirir algunas normas internacionales (alemana, escocesa, americana, española, sueca, suiza, y la internacional -ISO-), las cuales son ampliamente descritas en este proyecto. De esta manera, los resultados de las vibraciones producidas por estas voladuras se compararon con normatividad internacional, aplicándolas al caso específico de la iglesia de Mulaló. Los datos obtenidos demuestran que las vibraciones producidas por Cementos del Valle para ese período cumplieron con las normas.

Dada la ineficiencia de asociar la máxima velocidad resultante con la frecuencia estimada mediante los métodos tradicionales (cruce por ceros, análisis de Fourier y espectro de respuesta), se aplicó el método de frecuencia instantánea –desarrollado a partir de las relaciones tiempo-frecuencia–, el cual ha sido desarrollado en procesamiento de señales, sin haber sido usado antes para este fin. Se pudo determinar la similitud de ésta con cruce por ceros y la divergencia de éstas respecto al análisis de Fourier.

Buscando relacionar parámetros del diseño de las voladuras con la vibración producida por cada una de ellas, se utilizó la relación empírica $\dot{u} = K(R/\sqrt[3]{W})^{\alpha}$, frecuentemente utilizada para predecir la velocidad resultante ($\dot{u}$) a partir de la distancia escalada ($R/\sqrt[3]{W}$). A partir de un análisis de regresión por mínimos cuadrados se obtuvo para Mulaló $K =$ 104 , $\alpha =$ -1.40 y con R^2 de 0.26 y para San Marcos $K =$ 20, $\alpha =$ -0.97 y con R^2 de 0.04. Dada la baja correlación, se plantearon dos rectas con la tendencia aparente de los datos, obteniéndose para Mulaló $K =$ 251190 y $\alpha =$ -3.06 y para San Marcos $K =$ 1000000 y $\alpha =$ -3.06; la diferencia en el valor K podría deberse a cambios en la impedancia del suelo en San Marcos y Mulaló, pudiendo ser la una impedancia superior en el primero. La dispersión de los datos, causante de un mal ajuste por el método de mínimos cuadrados, puede deberse a la falta de cobertura en ordenes de magnitud de la velocidad resultante y la distancia escalada o también al uso de la carga total en lugar de la carga por intervalo de tiempo.

Palabras clave: señales de vibraciones, voladuras, normas internacionales en vibraciones, procesamiento de señales de vibraciones,.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

INTRODUCCIÓN

Las vibraciones que mayor atención han recibido en la Ingeniería Civil son las causadas por terremotos, por obvias razones: su enorme potencial de daño. Pero hay otro tipo de vibraciones, aquellas generadas por el ser humano - en el proceso mismo de la Ingeniería Civil (voladuras, máquinas vibradoras, tráfico, etc.) o en otras actividades - que son de gran importancia, porque también pueden incidir en la integridad de las estructuras y causar sensaciones molestas. Su conocimiento, evaluación y control es creciente, a medida que las fuentes de estas vibraciones aumentan presencia y potencia, aumentando de esa manera el potencial de daños, a medida que aumenta la percepción y el control de factores ambientales nocivos, y también porque estas vibraciones pueden ofrecer una posibilidad - consideradas como señales excitadoras - de resolver problemas de evaluación en la Ingeniería (dinámica de suelos y estructuras).

Estas vibraciones de causa humana requieren otro tipo de enfoque en su evaluación y control que las causadas por sismos, por varias razones:

- Por el mismo hecho de su causa - humana - estas vibraciones son controlables, si se entienden bien su generación, características y efectos.
- No pueden llegar a tener la intensidad de movimientos sísmicos, pero son mucho más frecuentes.
- El tipo de vibraciones generalmente es diferente a las sísmicas, en casi todas las características de forma de onda (contenido frecuencial, envolvente, duración, etc.)

La atención a estos fenómenos en Colombia es significativamente reciente y por tal motivo puede ser importante hacer una contribución a su conocimiento y promover su consideración sistemática en la Ingeniería Civil. En este proyecto se aborda el tema de vibraciones generadas por voladuras en minería, debido a que se dispone de una buena cantidad de información (datos y literatura técnica) sobre este tipo de vibraciones, y a la disponibilidad de Cementos del Valle (mina La Calera – Yumbo) para suministrar información sobre sus voladuras.

Para el desarrollo del tema es importante conocer una parte del proceso de experimentación, es por esto que la sección 2 se plantean las variables representativas del fenómeno y los equipos utilizados para medir estas variables. En esta sección también se presenta la instrumentación, sitios y periodos de medición utilizados para la elaboración de este proyecto.

Con el fin de evaluar los efectos de las vibraciones en las edificaciones se plantea el uso de normas internacionales (sección 3), las cuales se basan en principios físicos, así como en miles de observaciones de los efectos de las vibraciones sobre una gran cantidad de tipología

estructural. Adicionalmente en esta sección se encuentran los valores umbrales que son aplicables al área de estudio y al tipo de vibraciones (voladuras) generadas en la mina La Calera (Cementos del Valle).

La información obtenida en las estaciones de monitoreo de vibraciones debe ser procesada con el fin de ser comparada con la reglamentación internacional, con este fin se revisan en la sección 4 los diferentes tipos de análisis de señales sugeridos por las normas internacionales. Adicionalmente se plantea un método alternativo para calcular la frecuencia basado en las nuevas relaciones de tiempo-frecuencia y se muestra la secuencia de procesamiento. La comparación del procesamiento con los valores indicativos de las normas internacionales se tratan en la sección 5, también en esa sección se muestran las relaciones empíricas usualmente utilizadas en vibraciones producidas por voladuras.

El Anexo B presenta a manera de introducción al tema, y de forma general, los explosivos y sus propiedades, las clases de explosivos utilizados en minería superficial (como en la mina La Calera) y algunas técnicas de voladuras utilizadas en minas y canteras.

1. GENERALIDADES

1.1. Definición del Problema

Muchos procesos de la actividad humana en una sociedad industrializada generan vibraciones: tráfico vehicular, maquinaria de construcción, maquinaria industrial, voladuras. Estas vibraciones pueden generar molestia y daño. El potencial de efectos perjudiciales depende de diversas características de estas vibraciones, o de su conjugación: amplitud, frecuencia, duración, cantidad de ocurrencias, etcétera vs. las propiedades de comportamiento dinámico de los sistemas que excitan (frecuencia de resonancia y resistencia, principalmente). En suma, es el sistema con las componentes fuente-suelo transmisor-estructura el que determina en conjunto el efecto del fenómeno vibratorio.

En la práctica de la Ingeniería generalmente no es factible –por tiempos y costos– realizar evaluaciones detalladas de las componentes a predecir, y así poder controlar los efectos de las vibraciones en el medio. Al igual que en el caso de los terremotos, se recurre entonces a leyes empíricas generalizadas, recomendaciones genéricas y normas para evaluar si las vibraciones generadas por actividad humana –y específicamente las causadas por voladuras– pueden tener efectos adversos sobre las estructuras.

Todas estas normas –hasta ahora– han sido elaboradas en países con condiciones de suelos y tipos de materiales y estructuras diferentes a las usuales en Colombia; su aplicación local requiere entonces, como primer paso, un proceso de análisis de estas normas, al encontrar la factibilidad de uso de las normas se realiza el proceso de adaptación de ellas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Explorar el campo de las vibraciones causadas por la actividad humana, principalmente en la Ingeniería Civil, mediante el acopio y análisis de la literatura técnica existente en el ámbito mundial. Ejemplarizar la problemática de la evaluación y control de sus efectos mediante la toma, análisis e interpretación de datos reales en condiciones locales, para llegar a recomendaciones de procedimiento aplicables en la práctica de la Ingeniería en nuestro medio.

1.2.2. Objetivos específicos

- Investigar en qué punto se encuentra el estado del arte y técnica a escala mundial en cuanto al manejo de información de vibraciones y la normatividad sobre vibraciones producidas por actividad humana.
- Realizar mediciones de vibraciones producidas por voladuras en la cantera de Cementos del Valle – La Calera.
- Investigar y establecer procedimientos de análisis de vibraciones generadas por voladuras.
- Evaluar los niveles de las vibraciones producidas por las voladuras de la mina La Calera en Mulaló y San Marcos en el marco de la normatividad internacional.

1.3. Antecedentes

1.3.1. Ubicación geográfica

La mina La Calera de Cementos del Valle se encuentra ubicada en el Corregimiento de Mulaló, colinda al norte con la Inspección de San Marcos. Mulaló y San Marcos son parte del Municipio de Yumbo (Valle del Cauca — Colombia, ver Figura A.1 pág. 90), la mina se encuentra ubicada aproximadamente a 10 km al noroccidente de la cabecera municipal de Yumbo.

La zona considerada esta catalogada como rural y minera (PBOT, Municipio de Yumbo, 1997). La mina se encuentra comunicada con Yumbo por medio de la Carretera Panorama, a la cual se accesa por medio de una vía rural que comunica la Carretera Panorama con Mulaló y que llega hasta Loboguerrero.

1.3.2. Antecedentes geológicos

El lugar de explotación en la mina La Calera –Cementos del Valle- está ubicado sobre la Formación de Vijes. Nivia (2001) define esta formación como una unidad que consiste en una secuencia de calizas y areniscas (calcáreas y de cuarzo) que afloran al oeste y sureste de Vijes. Esta secuencia esta encima en contacto fallado con la Formación Volcánica –conformada por basaltos– y tiene un espesor variable cuyo máximo es aproximadamente 300 m al norte de la Quebrada San Marcos.

Al norte de la Quebrada San Marcos, terreno fuera del área de explotación, la base de la formación está marcada por un capa de conglomerado de aproximadamente 30 m de espesor hasta una capa de fragmentos líticos angulósos en el sur. La edad de la Formación Vijes

no esta bien definida, el consenso general es que está en el Terciario, entre el Eoceno y el Oligoceno.

Por otra parte los sitios de medición, Mulaló y San Marcos, son depósitos de vertiente relativamente jóvenes, cuya formación es probablemente del Cuaternario.

2. MEDICIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y SITIOS DE MEDICIÓN

2.1. Introducción

Una parte importante en la determinación de los efectos de las vibraciones causadas por voladuras se logra en el proceso de observación e interpretación. La observación en el caso de vibraciones causadas por actividad humana se realizan por medio de mediciones, las cuales se realizan con instrumentación especializada para el área.

En esta sección se tratará la parte de la experimentación relativa a las variables representativas del fenómeno vibratorio, la instrumentación utilizada para tal fin –a nivel informal– y las recomendaciones existentes sobre los lugares para realizar las mediciones en este tipo de trabajos – vibraciones producidas por actividad humana: Voladuras. Adicionalmente se describirán los equipos utilizados en este proyecto y los lugares y periodos de funcionamiento de estos.

2.2. Mediciones

2.2.1. Propósito de las mediciones

En la medición de vibraciones, el objetivo es detectar y registrar el movimiento vibratorio que es causado por fuerzas que pueden variar en magnitud y dirección, y que en el caso particular de este proyecto se deben a que parte de la energía de las voladuras es transmitida como ondas elásticas al medio. Esta información puede ser utilizada para: interpretación sismológica, caracterización y comparación con las normas de control de vibraciones, cálculos de dinámica de estructuras, etc.

Si la medición se realiza en alguna clase de estructura civil, entonces hay que tener en cuenta que el registro –alterado por la estructura geológica– es la respuesta de esta estructura a la vibración del suelo.

El problema básico conectado con la medición de vibraciones es el de establecer un punto fijo en el espacio donde se realizaran las mediciones. Durante el paso de la energía sísmica, todo el medio esta en movimiento, al igual que el instrumento de medición, como resultado no se puede realizar una medición absoluta del movimiento, al menos no con los medios convencionales disponibles. Los instrumentos diseñados para medir vibraciones –en general

llamados sismómetros– establecen un punto interno dentro de ellos que permanece relativamente quieto respecto al suelo o carcasa durante el paso de las vibraciones; las vibraciones son entonces medidas como el cambio en la posición del entre el punto interno del sensor y el suelo o carcasa.

2.2.2. Variables medidas en vibraciones

Las cantidades medidas deben reproducir el movimiento del suelo al paso de las ondas, esto requiere que se registren tres componentes ortogonales ya sea de la variable desplazamiento de partícula (u), velocidad ($\dot{u}$) o aceleración ($\ddot{u}$), y que estén función del tiempo continuo o discreto –señal análoga, discreta o serie temporal.

Las tres variables: desplazamiento de partícula, velocidad y aceleración están relacionadas analíticamente por $\ddot{u} = d\dot{u}/dt = d^2u/dt^2$, también por $\dot{u} = \int \ddot{u}\, dt$, además por $x = \int\int \ddot{u}\, dtdt = \int \dot{u}\, dt$. Para vibraciones armónicas existe la relación $\ddot{u} = \omega\dot{u} = \omega^2 u$, donde ω es la frecuencia angular. Así, la medida de uno de los parámetros permite en principio la determinación de cualquiera de los otros dos. Sin embargo, debido a las inexactitudes inherentes en los cálculos numéricos, es deseable y recomendado medir el parámetro particular de interés directamente.

Prácticamente todas las normas internacionales de manejo de vibraciones[1] han sido desarrolladas a partir del parámetro velocidad[2] y las mediciones fueron realizadas con a partir de instrumentos que miden este parámetro, es por esto que es deseable medir esta y no otra variable.

Cada una de las variables: desplazamiento, velocidad y aceleración son medidas con transductores diferentes; sin embargo, cada señal tiene información de las tres variables en rangos diferentes de frecuencia con diferente nivel de amplificación.

2.2.3. Rango de magnitud en variables de vibraciones por voladuras

El rango de magnitud de las variables medidas en vibraciones generadas por voladuras dependen de varios factores, entre ellos: distancia de la fuente, cantidad de explosivos detonados por intervalo de retardo, entre otros; la gran cantidad combinaciones posibles de los factores antes mencionados hace que el rango de magnitudes sea grande, Dowding (2001) sugiere los rangos generales que muestran en la Tabla 2.1, Bollinger (1980) mientras tanto, presenta valores algo mayores para registros a corta distancia.

Con base en la Tabla 2.1 se pueden calcular los rangos dinámicos de las variables medidas

[1]Tema tratado en la sección 3, página 19

[2]el motivo físico se explicara mas adelante en la sección 3.2.

Tabla 2.1. Rangos típicos de los parámetros de vibraciones

Parámetro	Rango			unidades
Desplazamiento	0.0001	→	10	mm
Velocidad de partícula	0.0001	→	1000	mm/s
Aceleración de partícula	10	→	100000	mm/s^2
Frecuencia	0.5	→	200	Hz
Longitud de onda	30	→	1500	m
Duración de pulsos	0.1	→	2	s

Fuente: Cording et al. (1974) en Dowding (2001)

(sujeto a errores por la naturaleza empírica de las observaciones), se puede observar que estos valores son bastante grandes: 100 dB para los desplazamientos, 140 dB en las velocidades de partículas y 80 dB en aceleraciones. Si nos guiamos por esta información –de naturaleza empírica–, la velocidad es la variable que tiene un mayor rango dinámico, y que nos proporcionará mayor resolución.

2.3. Instrumentación

Proakis y Manolakis (1998) definen instrumentación como el mecanismo que se utiliza para reunir información de algún proceso, esto implica que un instrumento esta compuesto de varias partes, entre ellas: un sensor, un transductor y un mecanismo de grabación digital o análogo.

En vibraciones, el sensor es la parte del sistema que responde a una excitación externa mientras que el transductor es el que se encarga de convertir la respuesta del sistema en una señal eléctrica. Comúnmente a el conjunto sensor/transductor se le llama simplemente sensor.

La descripción formal del sensor, transductor e instrumentación esta por fuera del alcance de este proyecto, una explicación de ese tipo puede ser encontrada por ejemplo en Aki y Richards (1980); Thomson (1982); Ogata (1987); Proakis y Manolakis (1998) entre otros. El punto es entonces mostrar informalmente la característica esencial para este proyecto del sensor: sensibilidad, y describir los tipos de transductores que son usados generalmente cuando se quiere caracterizar señales para su comparación con las normas.

2.3.1. Sensibilidad del sensor

Para la unidad básica de medición de vibraciones, la unidad sísmica (sistema de un grado de libertad con amortiguamiento), se pueden describir tres tipos de sensibilidad: 1) Sensibilidad al desplazamiento, 2) sensibilidad a la velocidad y 3) sensibilidad a la aceleración. Debido a

la relación analítica entre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, un instrumento que registra una variable, necesariamente registra las otras. La sensibilidad del sismógrafo debe escogerse para producir una señal útil de las vibraciones. En este proyecto se utilizaron sismómetros con sensibilidad a la velocidad (ver pág. 14), que son los más adecuados por ser los recomendados en las normas internacionales.

La unidad sísmica, base de muchos instrumentos de medición de vibraciones, es el sismómetro, el cual puede ser llamado de varias formas así: deplacímetro, velocímetro (geofonos en geofísica o genéricamente sismómetros en sismología e ingeniería) y acelerómetro. Estos términos conducen al hecho que la sensibilidad del sensor es constante respecto al parámetro dado sobre un rango de frecuencias del movimiento del suelo, pero no significa que no haya respuesta instrumental de los otros parámetros del movimiento.

El tipo de sensor que se utiliza depende de la aplicación particular. En el área de vibraciones de estructuras –dinámica estructural– es usual medir aceleraciones, las cuales están relacionadas directamente con las fuerzas inerciales en las estructuras; sin embargo, en vibraciones causadas por actividad humana, como voladuras en canteras y tráfico vehicular, el objetivo es la comparación con normas[3], las cuales plantean el uso de sismómetros de velocidad. La razón de fondo de las normas para medir velocidad se expone en la sección 3.2 (pág. 19).

2.3.2. Tipos de transductores

Por otro lado los transductores, los cuales convierten el movimiento en una señal eléctrica, dependiendo de la sensibilidad (desplazamiento, velocidad o aceleración) pueden ser:

Transductor de desplazamiento: Sistemas capacitivos.

Transductores de velocidad: Sistemas electromagnéticos.

Transductores de aceleración Sistemas piezoeléctricos y capacitivos.

Con algunas modificaciones es posible convertir un tipo de salida en otro parámetro diferente al originalmente propuesto. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó un transductor de velocidad, que es el más adecuado debido a la intención de medir velocidades.

2.4. Sitios de medición

Los sitios de medición recomendados por las normas internacionales de manejo de vibraciones pueden resumir en:

[3] Las normas se encaminan a minimizar el daño cosmético de las edificaciones

Representativos: Lugar en donde las condiciones geológicas (como eventuales modificadores de la vibración) son las más comunes.

Ubicación: El sitio mas cercano a la fuente de vibración donde este ubicada una edificación.

Importancia: Lugar donde se encuentre un edificación de interés, por ejemplo una edificación historica.

Los sitios escogidos para las mediciones en este proyecto entran en una o mas de estas categorías, por ejemplo: la iglesia de Mulaló es una edificación de interés –monumento histórico– y adicionalmente un lugar representativo de la región. Para mayor información ver a continuación.

2.5. Equipos, sitios de medición y periodos de funcionamiento del proyecto

2.5.1. Equipos utilizados

Los equipos utilizados en este proyecto fueron adquiridos por Cementos del Valle para su *Sistema de Monitoreo de Voladuras*, Estos equipos de medición –sistema de adquisición + sismómetros– fueron adquiridos a la empresa suiza GeoSys AG y corresponden a las series GCR16 y GSR18.

Para el análisis de vibraciones producidas por voladuras reportadas en este proyecto se ha utilizado información adquirida con los equipos GCR16 y GSR18. Adicionalmente, para verificar el correcto funcionamiento de estos, se instalaron temporalmente otros dos equipos con fines de calibración: 1) OSSOdas, un sistema digital autónomo de adquisición de señales sísmicas desarrollado en el OSSO (ver Fig. 2.1); 2) Minimate, un sistema digital para medición de vibraciones de terreno y sobrepresión del aire causadas por actividad humana, de la empresa canadiense Instantel (Fig. 2.2).

Los equipos GSR18 y GCR16 constan de un sistema digital de registro autónomo y un sensor de ingeniería externo con tres componentes ortogonales. Las características de estos equipos se muestran a continuación.

2.5.1.1. Equipo de adquisición GSR18 El GSR18 (Fig. 2.3) es un equipo de adquisición de datos sismológicos de 18 bits, es decir con un rango entre 4.77E^{-5} y 100 mm/s en 262144 divisiones; este sistema de adquisición puede ser usado con diferentes tipos de sensores, entre ellos: sismómetros, acelerómetros y cualquier sensor cuya salida este en el rango

Figura 2.1. Equipo de medición de vibraciones OSSOdas



0 a 5 V (Grob, 1997); si la salida no esta en el intervalo se debe realizar un acondicionamiento de la señal para que los valores entregados por el sensor estén en el rango mencionado. En la aplicación particular de este proyecto se escogieron los sismómetros SSA-320 (ver Fig. 2.4 y descripción del sensor en la pág. 14).

Durante la operación normal este equipo realiza continuamente las etapas de: amplificación, filtrado análogo y conversión digital del voltaje de salida del sensor. Una vez digitalizada la señal, está es guardada en un segmento de memoria dedicado a pre-eventos, que posteriormente mediante un algoritmo de detección es clasificada, guardada o borrada.

En la etapa de amplificación, las señales análogas de cada una de las componentes –3 en total– son incrementadas por medio de circuitos electrónicos análogos (amplificadores operacionales) independientes. Este sistema de adquisición viene con dos valores de ganancia ajustables, sin embargo, en pruebas de laboratorio realizadas en el OSSO se pudo determinar que el equipo tiene solamente un nivel de amplificación no ajustable.

La etapa de filtrado análogico de la señal sirve para atenuar y eliminar las señales que se encuentran encima de la mitad de la frecuencia de muestreo, señales que si se conservaran producirían "alias" (señales que se encuentran encima de la mitad de la frecuencia de muestreo y que aparecen en frecuencias inferiores). Esta etapa esta implementada en el

Figura 2.2. Equipo de medición de vibraciones Minimate – Instantel



sistema de adquisición con un filtro de 6 polos *Butterworth* pasa-bajo de 100 Hz. La señal análoga filtrada es luego digitalizada por un microchip conversor análogo-digital a 200 Hz.

Los algoritmos de detección incluidos en este sistema de adquisición son:

Relación STA/LTA graba un evento cuando la relación entre el promedio absoluto de la señal en una ventana de tiempo corta y el promedio en una ventana larga supera un valor preestablecido.

Nivel de señal Si la señal supera un valor preestablecido en un canal determinado, o en una combinación de ellos, entonces se graba un archivo.

Otras características particulares de este sistema de adquisición son:

- Sincronización del reloj interno por medio de GPS (Sistema de Posicionamiento Global).
- Capacidad de almacenamiento de datos de aproximadamente 144 minutos a 200 Hz.

Figura 2.3. Equipo de adquisición GSR18



2.5.1.2. Equipo de adquisición GCR16 Este sistema de adquisición fue diseñado para aplicaciones de Ingeniería Civil, es prácticamente igual en su concepción al GSR18, y la mayoría de información dada en la sección anterior aplica a éste también.

Los cambios de este sistema de adquisición respecto al GSR18 son:

- Resolución digital de 16 bits, con un rango de velocidades entre 0.0031 y 100 mm/s en 65536 divisiones,
- menor capacidad de almacenamiento (guarda aproximadamente 72 minutos registrando a 200 Hz),
- los algoritmos de detección de este sistema son: por nivel de señal, fecha — hora programada y continuo,
- sin GPS,
- tiene tres niveles de ganancia x1, x10 y x100,
- cuatro frecuencias de muestreo: 125, 250, 500 y 1000 Hz.



Figura 2.4. Sensor SSA-320 instalado en los equipos de adquisición GSR18 y GCR16

2.5.1.3. Sensor SSA-320 Este arreglo de sensores de GeoSys (fig. 2.4), esta basado en geofonos de sismica (GV-22 – OYO Corp.), a los cuales se ha cambiado la respuesta instrumental –específicamente se les ha realizado compensación en bajas frecuencias– por medio de circuitos electrónicos.

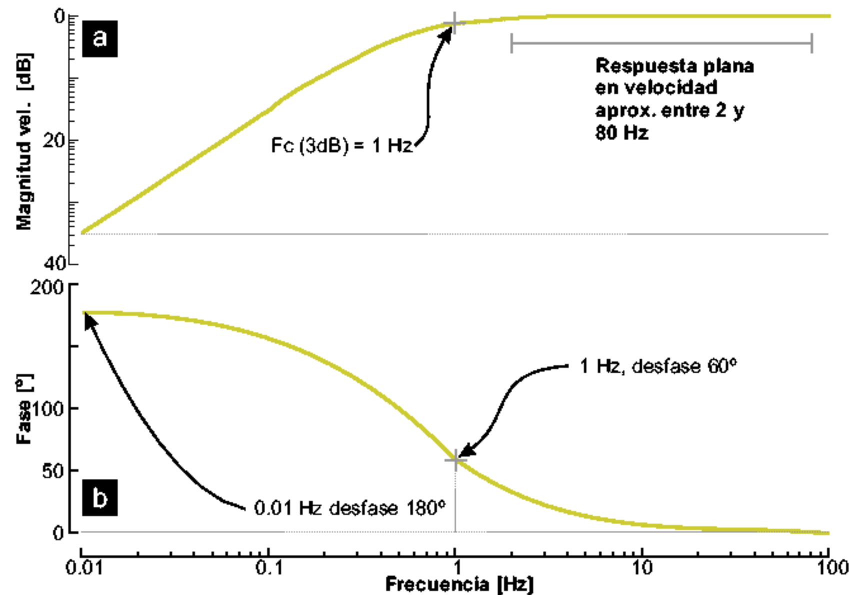
El SSA-320 consta de un arreglo ortogonal de sensores. Cada uno tiene respuesta plana en frecuencias proporcional a la velocidad en el rango aprox. de 2 a 80 Hz y una frecuencia de caída (o frecuencia de corte f_c) de 3 dB aproximadamente en 1 Hz (ver Fig. 2.5).

Un procedimiento común es la corrección instrumental (deconvolución de la señal con un filtro inverso a la respuesta del sensor), que pretende obtener la vibración real del terreno antes de haber sido modificada por el sensor. Esta operación tiene el inconveniente de ser inestable, y como las frecuencias de vibraciones medidas están aproximadamente en el rango lineal de velocidades se tomó la decisión de no realizar la operación de corrección instrumental.

2.5.2. Sitios de medición y periodos de funcionamiento

Los equipos GSR18 y GCR16, que fueron adquiridos por Cementos del Valle para su *Sistema de Monitoreo de Voladuras*, cuyos datos son la base de este proyecto, fueron operados previamente en diferentes ubicaciones de las poblaciones San Marcos y Mulaló (Figura A.2, pág. 91, Figuras A.5 y A.6, pág. 94) con el fin de valorar niveles de ruido, su influencia en

Figura 2.5. Respuesta en frecuencias del los sensores del SSA-320, -a- Magnitud en dB, –b- fase



la calidad y cantidad de voladuras registradas, y para descartar sitios con un fuerte efecto local. Los periodos y lugares de funcionamiento se detallan a continuación.

2.5.2.1. Sitios en Mulaló En esta población se realizaron mediciones previas a la instalación definitiva de la estación de monitoreo de vibraciones. Las primeras mediciones se realizaron en 1998 en el patio posterior de la iglesia de Mulaló (posición 3.6388 N y -76.4880E en coordenadas cartográficas), emplazamiento donde actualmente está instalada la estación definitiva. El experimento consistió en medir 5 voladuras con cargas entre 1 y 3 toneladas, usando un equipo acelerométrico de la Universidad del Valle (datos no utilizados en este proyecto). Con estas primeras observaciones se dieron pautas para la adquisición de equipos y se propusieron sitios para su instalación según criterios técnicos, logísticos y sociales.

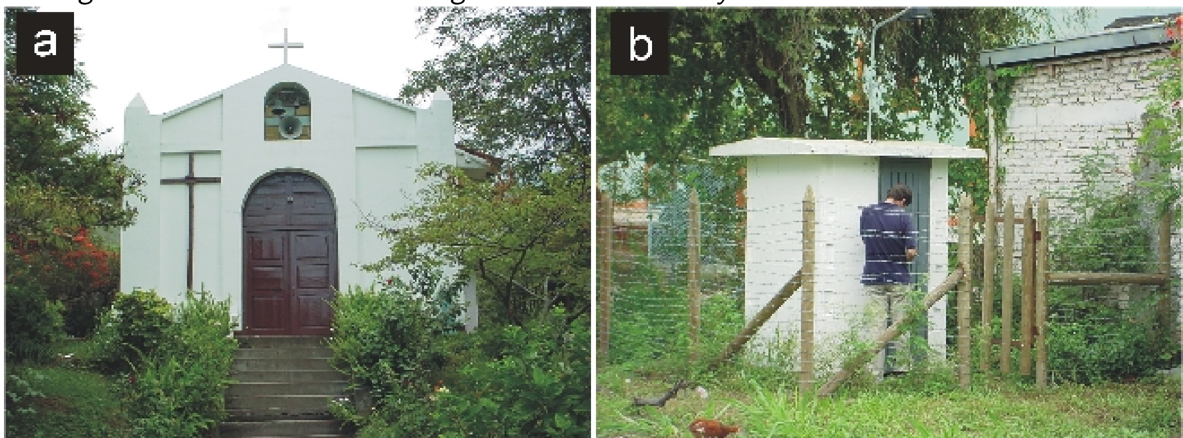
En junio de 1999 se instaló uno de los equipos en la casa del señor Leo Sieber (estación "Sieber", posición 3.6394N y -76.4835E en coordenadas cartográficas), ubicada aprox. 500 m al NEE del la iglesia de Mulaló (ver etiqueta "Leo Sieber" en la figura A.2). El equipo de adquisición instalado en este lugar fue el GSR18, y se coloco en ese lugar porque: 1) cumplía con requerimientos de seguridad y 2) es un sitio donde - por cercanía al área de explotación - se pueden esperar velocidades de vibración mayores que en otras áreas de la población.

La estación funcionó en ese lugar hasta finales de mayo de 2001, cuando la instrumentación fue retirada por problemas de seguridad, y a que se observó un marcado efecto de sitio debido a los depósitos aluviales de la quebrada Mulaló y cambios antrópicos del terreno, con lo cual este sitio no era representativo para las condiciones generales de los suelos de Mulaló.

En junio de 2000 se inició la búsqueda de sitio para reemplazar la estación "Sieber". Los días 28 y 29 de este mes se realizaron mediciones en un lugar intermedio entre el sitio donde estaba operando el equipo (estación "Sieber") y el sitio donde se realizaron las primeras pruebas (Iglesia Mulaló). Al analizar la información de este nuevo sitio (cercano al la quebrada Mulaló) se encontraron problemas similares a los presentados en la estación "Sieber", y se determinó que el mejor lugar para la instalación de la estación de monitoreo de vibraciones era el solar detrás de la iglesia de Mulaló. Este nuevo sitio tiene varias ventajas, como la de ser un terreno representativo del área poblada, estar localizado junto a una construcción con alto grado de susceptibilidad (una iglesia centenaria, de mampostería sin refuerzo), y ser de mucha presencia social.

En marzo del 2001 se construyó la caseta en Mulaló en los predios de la iglesia (Figura 2.6, –a-), quedando ubicada en la parte posterior del predio (Figura 2.6, –b-). Como parte del trabajo de construcción se fundió a aprox. 20 cm de profundidad un solado cuadrado de 30 cm de lado (Figura 2.4) para anclar el sensor, el mismo tipo de zócalo construido también en la caseta de San Marcos; con esta similitud se asegura la comparabilidad de los registros de ambas estaciones. La estación de monitoreo de vibraciones en Mulaló (en la Iglesia) ha operado de forma continua desde junio de 2001 hasta la fecha de impresión de este proyecto (10 de mayo de 2004).

Figura 2.6. Foto frontal de la iglesia de Mulaló -a- y caseta ubicada en ese sitio -b-



2.5.2.2. Sitios en San Marcos Para la selección del sitio de monitoreo de vibraciones en San Marcos se realizaron varias visitas a la localidad. La principal dificultad que se

encontró en la selección del sitio fueron los altos niveles de vibraciones ambientales que se registran en toda el área de San Marcos, provenientes del tráfico vehicular en la Carretera Panorama y de la actividad agraria que se desarrolla en la región. Finalmente se seleccionó un sitio alejado (posición 3.6594N y -76.4646E en coordenadas cartográficas) de la carretera y cercano a la cantera (ver Figura A.2, pág. 91), cuyos suelos son representativos del sector.

En diciembre del 2000 se construyó la caseta para la estación de monitoreo de vibraciones en el lugar seleccionado (Figura 2.7) y en enero de 2001 empezó a funcionar la estación de monitoreo, la que ha operado en el mismo lugar hasta la fecha (10 de mayo de 2004).

Figura 2.7. Fotos de la estación de monitoreo de vibraciones en San Marcos



2.5.2.3. Periodos de funcionamiento El primer sistema de adquisición instalado fue el GSR18, que operó en la estación "Sieber" (Figura A.2, pág. 91) en el periodo junio 24 de 1999 a mayo 5 de 2001. Los días 28 y 29 de junio de 2000 se realizaron pruebas con el GCR16 en un sitio intermedio entre la estación Sieber y la iglesia de Mulaló con el fin de buscar un reemplazo para la estación Sieber.

En enero 18 de 2001 se instaló en la estación San Marcos el equipo de adquisición GCR16, el cual fue retirado para mantenimiento día 13 de mayo de 2001 y fue reinstalado en el mismo sitio el 19 de mayo.

El 23 de mayo de 2001 el equipo GSR18 fue instalado en San Marcos (donde a operado hasta el momento), funciono junto con el GCR16 hasta el 24 junio de 2001, día en que fue retirado el GCR16 y trasladado la caseta de Mulaló donde a operado hasta esta fecha.

Durante todo el periodo de funcionamiento de las estaciones se han realizado visitas rutinarias –semanales o quincenales– con varios objetivos, entre ellos: bajar información, revisar el funcionamiento de los sistemas de adquisición, realizar ajustes en los parámetros de adquisición –cuando es necesario–, realizar mantenimiento de la estación. Los Tabla 2.2 contiene el resumen del funcionamiento y ubicación de las estaciones de monitoreo de vibraciones.

Tabla 2.2. Períodos de funcionamiento y ubicación de las estaciones de monitoreo sísmico de voladuras de Cementos del Valle

Período			Estación	Equipo
1999/05/24	→	2001/05/05	Sieber[a]	GSR18
2000/06/28	→	2000/06/29	na.	GCR16
2001/01/18	→	2001/05/13	San Marcos[b]	GCR16
2001/05/19	→	2001/06/24	San Marcos	GCR16
2001/05/23	→	presente	San Marcos	GSR18
2001/06/24	→	presente	Mulaló[c]	GCR16

[a] En Mulaló, posición 3.6394N y -76.4835E coordenadas cartográficas.
[b] Posición 3.6594N y -76.4645E en coordenadas cartográficas.
[c] Parte posterior de la iglesia de Mulaló, posición 3.6388N y -76.4880E en coordenadas cartográficas.

3. REGLAMENTACIÓN EN MANEJO DE VIBRACIONES

3.1. Introducción

Durante la última década se ha incrementado el número de estructuras sometidas a solicitaciones por vibraciones, esto influenciado por migraciones de poblaciones a sitios con fuentes generadoras de vibraciones. Pero también ha aumentado la cantidad y magnitud de las vibraciones, principalmente debido factores sociales y económicos que han impulsado el desarrollo, entendido como producción a gran escala de las obras civiles y minería (fuentes generadoras de vibraciones). Con el aumento en los niveles de vibraciones, la cantidad de edificaciones y de fuentes generadoras de vibración, es necesario entonces poner cotas máximas a los niveles de vibraciones con el fin de evitar daños en las edificaciones.

En el ámbito internacional, las vibraciones producidas por voladuras con posibilidad de daños en edificaciones, se han realizado en acuerdo con ciertos niveles de vibraciones máximos. Los valores máximos, encontrados por medio de mediciones y reconocimiento de daños en edificaciones, incluyen cierto margen de seguridad, y son en muchos casos parte de una legislación o normatividad técnica.

El fin de esta sección es revisar y aplicar la normatividad internacional en un contexto local. Aquí se muestran algunos de los conceptos básicos en los que se basa la normatividad internacional (sección 3.2), se revisan algunas de las normas internacionales (sección 3.3) y se implementan los valores representativos para el caso particular de mina La Calera (sección 3.4)

3.2. Aspectos básicos

Las vibraciones causadas por el ser humano pueden causar daños desde estructurales a cosméticos en las edificaciones; en la mayoría de los casos tales vibraciones son generadas por voladuras, maquinaria de construcción y tráfico vehicular o férreo.

Estas vibraciones inducen esfuerzos dinámicos en edificaciones, generando deformaciones temporales en todos los elementos constitutivos de la edificación. Sumados a los esfuerzos estáticos preexistentes, estas deformaciones dinámicas pueden causar daños en la edificación.

La relación entre velocidad de vibración –velocidad de partícula o resultante– y esfuerzos, en el caso idealizado de una onda plana en un medio elástico infinito, está dada por

$$\sigma = \varepsilon E, \varepsilon = \dot{u}/c, \sigma = \dot{u}E/c,$$

siendo σ el esfuerzo, ε la deformación, E el módulo de elasticidad, $\dot{u}$ la velocidad de partícula y c la velocidad de propagación de la onda sísmica (Persson et al., 1994). En consecuencia, para un substrato geológico y un tipo de edificación determinado (i.e, velocidad de propagación y módulo de elasticidad constante), la velocidad de vibración de partícula es la variable decisiva, es decir es la que determina los esfuerzos, los que pueden ser los causantes de daños. Por esta razón, todas las normas y recomendaciones relativas al potencial de daños por estremecimientos generados por vibraciones de causa humana utilizan la velocidad de vibración como variable básica.

Por otro lado, la magnitud de las deformaciones que un nivel de vibración dado genera en una estructura también depende del comportamiento dinámico de ésta, y en particular de sus frecuencias de resonancia o respuesta (las de la estructura en conjunto y las de los elementos individuales). Por ésto, la frecuencia (el inverso del período) de la vibración incidente es la segunda variable básica en la evaluación del potencial de daños.

Sin embargo, la probabilidad de daños por vibraciones depende de muchos otros factores, tales como:

- la duración de las vibraciones,
- la cantidad de solicitaciones a las que es sometida la estructura,
- la resistencia de los materiales que constituyen la estructura,
- la calidad de la construcción - los esfuerzos estáticos preexistentes (incrementados por ejemplo por asentamientos del suelo)
- el nivel de mantenimiento y conservación de la estructura.

Una evaluación rigurosa del potencial de daños por vibración en una serie de estructuras no es económicamente justificable en la mayoría de los casos. Por esto se ha recurrido generalmente a normas y recomendaciones que relacionan características de la estructura y del suelo de cimentación con el tipo de vibración, o con los niveles de vibración (velocidad de partícula, frecuencia dominante, cantidad de solicitaciones), o sólo con características de la voladura misma (cantidad de carga, distancias, etc.) Estas normas generalmente se fundamentan en la experiencia de varias décadas, involucrando miles de mediciones y observaciones de daños. Sin embargo, su aplicación en ambientes diferentes a los de su origen requiere una cuidadosa evaluación y asimilación, debiéndose considerar aspectos tales como las tipologías de las estructuras, materiales de construcción y prácticas constructivas. Con este requisito, las normas también pueden ser utilizadas como guías en países que no poseen norma propia, como ocurre en Colombia.

Salvo las normas específicas para voladuras con explosivos, las reglamentaciones para el control de efectos de vibraciones antropogénicas no distinguen el tipo de fuente. En esos

casos la diferenciación de la fuente se hace a partir de los parámetros de movimiento, estableciendo diferencias según la cantidad de solicitaciones –duración de los máximos– presentes en la señal.

Hoy en día el control de los efectos adversos de vibraciones causadas en la Ingeniería Civil y Minería, se logra mediante el acatamiento de los niveles sugeridos en las normas especificas, así como mediante el diseño y manejo apropiado de los respectivos equipos y procesos causantes de las vibraciones. Por ejemplo los niveles de vibración causados por voladuras se pueden reducir mediante la limitación de las cargas o secuenciando las voladuras de tal forma que la energía transmitida al suelo sea distribuida en el tiempo, lo cual disminuye las velocidades máximas de vibración. Hoy en día hay técnicas aún más sofisticadas, que mediante una secuenciación muy controlada (y previamente diseñada) logran fenómenos de interferencia destructiva y directividad en el campo de ondas generado por la voladura.

Los valores máximos de velocidades de partícula permitidos o recomendados varían de una norma a otra. Quizás el valor indicativo que más se ha implantado es el de 2 pulg/s (50.8 mm/s), que se fundamenta en voluminosas observaciones de Langefors y Kihlström (Bollinger, 1980; Persson et al., 1994), quienes en 1963 establecieron, para diversos tipos de suelos, valores de la velocidad de partícula pico y sus efectos asociados.

Por otro lado, es importante evaluar las vibraciones en 3 direcciones ortogonales (como algunas normas lo exigen), con el fin de observar asimetría de radiación en las voladuras, propiedades de los diferentes tipos de onda generadas, así como observar particularidades de la transmisión de ondas elásticas en el suelo.

3.3. Reglamentación Internacional

Como parte de este proyecto se plantea la utilización de normas internacionales sobre el control de vibraciones, la Tabla 3.1 muestra aquellas que son relevantes a criterio del autor.

Tabla 3.1. Normatividad internacional en el manejo de voladuras

Pais de procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Alemania[a]	DIN 4150	1975
Brasil	CETESB D7.013	1998
Escocia	PAN50	2000
EEUU - Federal	USBM RI8507	1980
EEUU - Federal	OSM 817.67	1983
España	UNE 22-381-93	1993
Francia	Recomendaciones GFEE	2001
Internacional	ISO 4866	1990
Italia	UNI 9916	1991
Nueva Zelanda	NZS 4403	1976
Portugal	NP2074	1983
Reino Unido	BSI 6472	1992
Reino Unido	BSI 7385	1993
Sueca	SS 460 48 46	1991
Suiza	SN 640 312a	1992

[a] La norma alemana tiene además tres actualizaciones en los años 1999 y 2001.

Sin embargo, las normas que se utilizaran en este trabajo son: -1- DIN 4150 (Alemania) de 1975 y actualizaciones, -2- PAN50 (Escocia), -3- USBM RI8507 (EEUU), -4- OSM 817.67 (EEUU), -5- UNE 22-381-93 (España), -6- ISO 4866 (Internacional), -7- SS 460 48 46 (Suecia) y -8- SN 640 312a (Suiza). Se escogieron estas ocho normas, por disponibilidad (1 –actualizaciones–, 2, 4, 5, 6, 8) o por que se encontraron referencias indirectas a los valores representativos de ellas (1 –1975–, 3, 7).

Con el fin de tener una visión panorámica de las normas y sintetizar los diferentes aspectos de ellas en lo que respecta a: variables, valores indicativos, sensores, tipos constructivos, etc. se elaboró la Tabla A.4 (pág. 89).

De las normas disponibles, se tradujeron la PAN50 (Escocia) y la SN 640 312a (Suiza), en inglés y alemán respectivamente, las que se incluyen en el anexo C, adicionalmente se incluyó la UNE 22-381-93 (España).

3.3.1. Alemania - DIN 4150

El Instituto de Normalización Alemana o DIN (Deutsches Institut für Normung) ha publicado varios criterios de niveles máximos de vibración, el primero en 1975, el cual fue desglosado (3 partes) y actualizado en 1999 y 2001.

Los criterios de la DIN 4150 de 1975 a partir de información en Persson et al. (1994) se

resumen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resumen de los valores indicativos de la norma DIN 4150

Campo de aplicación	Vibraciones producidas por cualquier fuente.
Variables medidas	Velocidad vertical pico [mm/s] y velocidad de partícula pico o resultante [mm/s].
Valores indicativos	Ver tablas A.2.

Los valores indicativos recomendados por la DIN 4150:1975 dependen del tipo de edificación, como se muestran en la tabla A.2 (página 87). Una de las características importantes en esta norma es la inclusión de valores máximos (de partícula y pico vertical) para edificaciones históricas, lo cual es importante para este proyecto debido a que en el área de estudio existe una de estas: la capilla de la hacienda Mulaló.

Las actualizaciones de la norma DIN mencionadas son: 1) Predicción de los parámetros de medición (DIN, 2001b), 2) Efectos en las personas dentro de edificaciones (DIN, 2001c) y 3) Efectos en estructuras (DIN, 2001a). De estas tres, la ultima es la mas atractiva para este proyecto.

3.3.2. Escocia - PAN50

Esta norma, desarrollada en Escocia y publicada en febrero de 2000, se basa en los estándares: BSI (British Standard Institute) BS-6472 de 1992 y BS-7385 partes 1 (sobre la medición) y 2 (sobre los efectos) de 1993, las guías de planeación nacional NPPG (National Planning Policy Guidelines) 4, 14 y 16, y las PAN (Planning Advice Notes) 56 y 58.

El Anexo D de la PAN 50 (*Control de efectos ambientales de trabajos en minería superficial*), provee sugerencias para las autoridades encargadas de planificación así como a la industria minera de los efectos de las voladuras y de los limites aceptables en este tipo de trabajos. Las áreas en que actúa esta norma, las cuales implican impacto sobre el medio ambiente, construcciones y personas son: 1) Vibraciones del suelo, 2) Presión acustica (sobre-presión del aire), 3) Ruido, 4) Polvo, 5) Eyección de rocas.

Los puntos principales tratados en esta norma en cuanto se refiere a vibraciones producidas por voladuras son: 1) lugar donde se debe realizar las mediciones, donde aconsejan seguir las normas del BS-7385 parte 1 (ver resumen en tabla 3.3.2 – sitios de medición); 2) los niveles de amplificación en estructuras, se definen en un rango de frecuencias entre 5 y 40 Hz donde las estructuras pueden amplificar los movimientos del suelo y es probable que se presente daño cosmético; 3) los umbrales y tipos de daños en las viviendas producidos por vibraciones (véase resumen en Tabla 3.4); y 4) los efectos de la geología en las vibraciones inducidas por voladuras.

Tabla 3.3. Resumen de los valores indicativos de la PAN50

Campo de aplicación	Vibraciones en el suelo producidas por voladuras, pero también presión acustica, ruido, polvo y eyección de rocas.
Variables medidas	Velocidad pico en cada componente[mm/s] y velocidad de partícula –resultante– pico [mm/s].
Valores indicativos	de 6 a 10 mm/s en el 95 % de las voladuras en un periodo de 6 meses, para voladuras individuales no debe ser superior a 12 mm/s. Adicionalmente valores en los que se pueden producir daños (Tabla 3.4)
Sensores utilizados	Sensores de tres componentes que registren velocidad.
Sitio de medición	Sobre el suelo, cerca de la fachada mas cercana al sitio de voladura, cuando hay quejas también se realizan mediciones dentro de la estructura.
Particularidad	Define velocidades mínimas.

Tabla 3.4. Valores de velocidad de partícula pico asociados con diferentes tipos de daños en la norma PAN50 Anexo D - Escocia

		Valores Indicativos (mm/s)		
Tipo de daño	Características	< 4 Hz	$4 - 15$ Hz	> 15 Hz
Cosmético	Formación de grietas finas, crecimiento de grietas existentes en estuco, paredes delgadas o mortero.	15	20	50
Menor	Formación de grietas largas, perdida o caída de superficies de estuco, grietas en bloques de concreto y ladrillo.	30	40	100
Estructural	Daño en elementos estructurales.	60	80	200

Tomado de Scottish Executive (2000).

El rango de valores máximos de 6 a 10 mm/s para conjuntos de voladuras o 12 mm/s para voladuras aisladas son concertados entre las empresas que realizan las voladuras y los organismos de planeación local, es decir se llega a un arreglo en cuanto a los valores máximos que la empresa generara, los cuales no deben ser mayores a los que causan daño cosmético en la proximidad de la vivienda más cercana a la zona de explotación minera (véase Tabla 3.4).

Una de las recomendaciones interesantes de esta norma consiste en limitar el nivel de vibraciones mínimas a 6 mm/s, optimizando así el número de voladuras. Esto es, si los niveles de vibraciones son pequeños, es porque probablemente la empresa minera esta realizando voladuras pequeñas, las cuales son a la larga antieconómicas.

3.3.3. EEUU - OSM 817.67

La norma federal de los EEUU pertinente es administrada por el OSMRE (*Office of Surface Mining, Reclamation and Enforcement*). La sección 817.67 (*"Use of explosives: Control of adverse effects"*), originalmente desarrollada para su uso en minería de carbón, prevé varios procedimientos para determinar los límites de velocidades de vibración de partícula, dependiendo del nivel de monitoreo disponible. Las características fundamentales de esta norma se presentan en la tabla 3.3.3.

Tabla 3.5. Resumen de los valores indicativos de la norma OSM 817.67

Campo de aplicación	Vibraciones en el suelo producidas por voladuras en minas de carbón.
Variables medidas	Velocidad de partícula pico [mm/s] en cada componente o velocidad resultante pico [mm/s] del arreglo tridimensional de sensores.
Valores indicativos	25.4 mm/s a distancias entre 100 y 1500 m y 19.0 mm/s para distancias superiores
Sensores utilizados	Sensores de tres componentes que registren velocidad.
Debilidades	No es autosuficiente, necesita de la USBM RI8507 cuando se necesite utilizar la frecuencia en el análisis.

Esta norma considera solamente la velocidad con valores máximos aceptables para distancias entre 100 y 1500 m de 25.4 mm/s y para distancias mayores de 19.0 mm/s. Los máximos admisibles son aplicables en la mayor velocidad encontrada en los tres sensores ortogonales. Los valores y procedimientos de la OSM 817.67 son además la base para otras normas estatales de los EEUU.

Esta norma refiere a los valores indicativos de la USBM RI8507 cuando se puede calcular la frecuencia dominante de las vibraciones. La ventaja radica en que los valores máximos de la USBM RI8507 son mayores a los del OSM 817.67 para frecuencias altas.

3.3.4. EEUU - USBM RI8507

La USBM RI8507 no es realmente una norma, es un reporte de investigación del departamento de minas de EEUU (USBM – *U.S. Bureau of Mines*) de los efectos de las vibraciones producidas por la mina de carbón Ayrshire en Evansville –Indiana– sobre viviendas cercanas (Siskind et al., 1993).

Aunque la RI8507 no es es una norma, sus valores han sido aceptados en todo el mundo como umbrales para daño cosmético en viviendas debido a vibraciones causadas por voladuras. Las características fundamentales de la BI8507 se encuentran en la tabla 3.6

Tabla 3.6. Resumen de la USBM RI8507

Campo de aplicación	vibraciones producidas por voladuras
Variables medidas	Velocidad de partícula pico [mm/s], frecuencia asociada a la máxima velocidad pico [Hz]
Valores indicativos	ver linea puntea en figura 3.1
Sensores utilizados	Sensores de tres componentes que registren velocidad.
Debilidades	Valores debajo de los 4 Hz no fueron comprobados. Las mediciones se realizaron con una distancia escalada† aparentemente constante. Son unicamente aplicables a viviendas

†Relaciona la carga y la distancia de la voladura con la velocidad de partícula, es de la forma $v = K/(R/\sqrt{W})^{\alpha}$, donde R es la distancia entre la voladura y el sitio de medición, W es el peso de la carga por micro-retardo, v es la velocidad de partícula K y α son constantes que dependen del sitio.

El RI8507 considera voladuras clasificadas como pequeñas en minería de carbón (menores a 2000 kg de explosivos por retardo), y que serían consideradas grandes en otros trabajos de minería y canteras. Las distancias usadas en este informe fueron de unos cuantos kilómetros de distancia –distancias moderadas–, con registro de daños en viviendas de uno y dos pisos. Uno de los alcances del RI8507 fue demostrar la incidencia de la frecuencia de las vibraciones en el daño de las estructuras.

La principal dificultad en USBM RI8507 radica en la poca información por debajo de los 4 Hz (véase figura 3.1). Al no tener suficiente información experimental en el rango 0 a 4 Hz trazaron una linea con pendiente 0.03 pulgadas ente 0 y 4 Hz (antiguo criterio de daño por sismos).

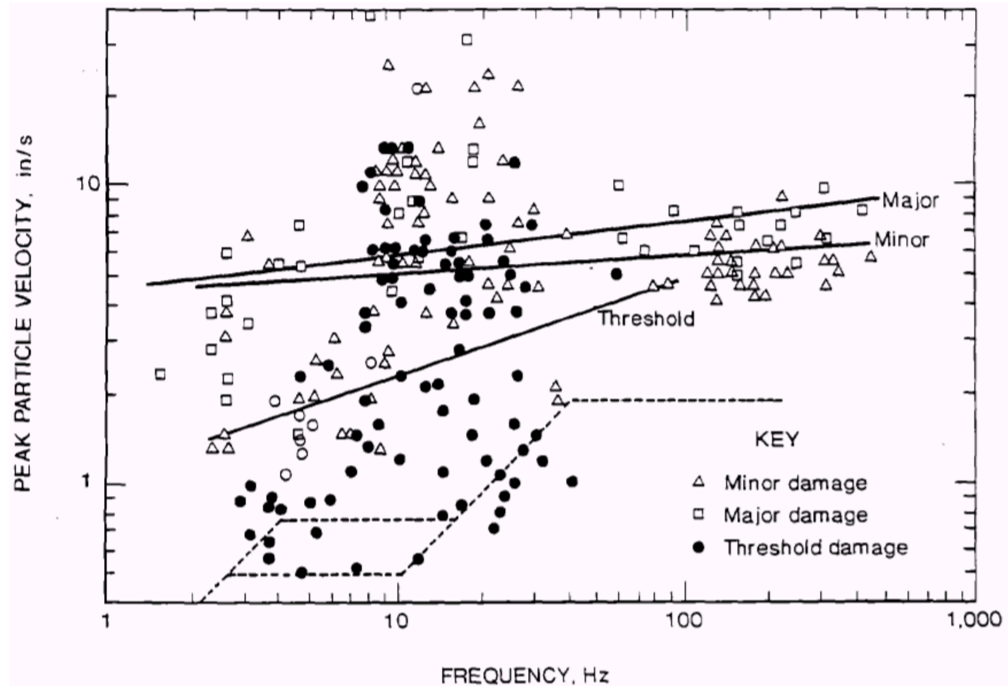
Los valores máximos admisibles de velocidades de partícula en los Estados Unidos están resumidos en la Figura 3.1; estos valores son aplicables únicamente para viviendas, y diferenciandolas según el tipo de mampostería (yeso y paredes aligeradas)

3.3.5. España - UNE 22-381-93

La norma española "Control de vibraciones producidas por voladuras" (AENOR, 1993), elaborada por la *Asociación Española de Normalización y Certificación* (AENOR) tiene como objetivo principal establecer un procedimiento de estudio y control de las vibraciones producidas por voladuras en trabajos de explotación de minas, canteras, obras civiles, demoliciones y otras técnicas que requieran el uso de explosivos (por ejemplo compactación de suelos). Los puntos relevantes de esta norma se presentan en la tabla 3.7.

Según esta norma el valor pico de la velocidad de vibración corresponde a la máxima desviación del registro positivo o negativo medido respecto al nivel cero u origen de la señal. Ya que la norma reglamenta velocidades máximas, cualquier registro que no sea de

Figura 3.1. Compendio de daños por vibraciones del USBM RI8507, la linea punteada corresponde a los limites hasta donde no se produce daños, tomado de Siskind et al. (1993)



velocidad debe ser llevado a estas unidades por medio de derivación (cuando se tienen desplazamientos) o integración (si se tienen aceleraciones), sin embargo hay que tener en cuenta los problemas que estas operaciones puedan tener y que por lo tanto es preferible medir las velocidades directamente (ver sección 2.2.2, pág. 7).

Como ya se mencionó, la velocidad máxima se selecciona de uno de los tres sensores ortogonales, específicamente del que tenga el máximo. En el arreglo de sensores, dos deben estar ubicados en una plano horizontal y uno perpendicular a éste (vertical); de los sensores en el plano horizontal uno debe estar orientado en dirección a la fuente – Longitudinal – y otro perpendicular a la longitudinal –Transversal–.

Tabla 3.7. Resumen de la norma UNE 22-381-93 (España)

Campo de aplicación	Vibraciones producidas por voladuras.
Variables medidas	máxima velocidad pico en las componentes ortogonales en [mm/s] y frecuencia en Hz.
Valores indicativos	véase Tabla 3.8.
Sensores utilizados	Sensores de tres componentes que registre velocidad (preferiblemente), desplazamiento o aceleración; respuesta lineal del equipo en el rango 2 a 200 Hz, capacidad de detección de niveles pico de al menos 1 a 100 mm/s.
Ubicación sensores	Sobre el suelo cercano a la(s) estructuras que van a estar sometidas a las vibraciones.
Fuerte	— Cubre gran cantidad de tipos estructurales; — por medio de un procedimiento sencillo se puede determinar el tipo de estudio de vibraciones requerido por el proyecto.

Tabla 3.8. Valores de velocidad máximos en mm/s y frecuencias para la prevención de daños según la norma española UNE 22-381-93

		Frecuencia principal (Hz)		
		2 – 15	15 –75[a]	>75
	Tipo de estructura	Vel.[b]	Desp.[c]	Vel.
I	Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.	20	0.212	100
II	Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa española. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones	9	0.095	45
III	Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener	4	0.042	20

Con base en AENOR (1993).

[a] En el tramo de frecuencias comprendido entre 15 y 75 Hz, en los que el nivel está dado en desplazamiento, se podrá calcular la velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal a través de la ecuación

$$V = 2\pi f d,$$

donde V es la velocidad de vibración equivalente en mm/s, f es la frecuencia principal en Hz y d es el desplazamiento admisible en mm indicado en la tabla.

[b] Velocidad máxima en mm/s.

[c] Desplazamiento máximo en mm (ver comentario a.)

Si el tipo de estructura no se encuentra en una de las tres descritas (Tabla 3.8) entonces la entidad de planeación municipal es la encargada de ajustar los criterios con el fin de velar por la seguridad de personas e instalaciones, dependiendo del tipo de proyecto y de estructura.

En esta norma la frecuencia dominante o principal (Hz) puede ser determinada por tres métodos: 1) Por medio de Análisis de Fourier, 2) con el espectro de respuesta de la señal o el pseudo-espectro de velocidad o 3) por medio de análisis de vibraciones armónicas (en la norma: análisis de semiperiodo) en el tramo de máxima velocidad de la señal.

Si se presentan varios máximos en la señal, la norma establece: *"Puede darse la circunstancia de que un registro presente varios picos de velocidad de vibración del mismo orden y con diferentes frecuencias. En este caso, habría que considerar la menor de las frecuencias. Esta circunstancia queda cubierta si se realiza un análisis de Fourier o de respuesta"* (en AENOR, 1993, página 4), pero antes de obrar hay que pensar, de lo cual surgen las siguientes inquietudes:

- No hay una relación directa entre el máximo en el dominio del tiempo y máximos en el dominio de la frecuencia en oscilaciones transitorias.
- La duración de la oscilación es tan importante como el valor máximo y la frecuencia; cuando se realiza análisis de Fourier o de respuesta lo que prima es la duración de la oscilación (energía de la oscilación en la señal).
- Es cierto que las frecuencias bajas, tienen más influencia en la respuesta de edificaciones, pero en el caso de elementos no estructurales (en los cuales se presenta daño cosmético) influyen mas las frecuencias altas.

3.3.6. Internacional ISO 4866

La ISO, Organización Internacional para Estandarización, por medio del comité técnico de vibraciones mecánicas y choque ISO/TC 108 crearon el estándar ISO 4866: *"Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement an evaluation of their effects on buildings"* en 1990 (ver ref. ISO, 1990), teniendo dos correcciones posteriores en los años 1994 (ref. ISO, 1994) y 1996 (ref. ISO, 1996).

En si la ISO 4866 no presenta valores indicativos de vibraciones, ya que este estándar esta creado para establecer principios básicos de medición y procesamiento de señales, con el fin de evaluar los efectos de las vibraciones en estructuras. Este estándar es considerado como una guía técnica para la elaboración de normas regionales e investigaciones.

La medición de niveles de vibración según este estándar tiene como propósitos: 1) *reconocimiento de problemas* donde se reporte vibraciones en edificaciones, que causen consternación en los ocupantes y sea necesario evaluar niveles que garanticen la integridad estructural, 2) *monitoreo de control* donde niveles de vibración máximos permitidos han sido establecidos por alguna agencia y requieran se reportados, 3) *Documentación* de cargas dinámicas que hayan sido consideradas en el diseño estructural, donde se realizan mediciones

para verificar la predicción y reajustar parámetros en nuevos diseños (por ejemplo la Norma Sismo-resistente Colombiana — NSR-98), y 4) *diagnóstico* cuando los niveles establecidos de vibraciones requieran más investigación.

Tabla 3.9. Aspectos importantes en la reglamentación ISO 4855 de 1990.

Campo de aplicación	Vibraciones en general (voladuras, tráfico, hincado, maquinaria, etc.) excluyendo vibraciones acústicas.
Variables medidas	Depende del campo de aplicación, pero en general aceleración o velocidad (tabla A.3), frecuencia y duración de la oscilación.
Valores indicativos	No aplica.
Sensores utilizados	Recomienda acelerómetros o sensores que midan velocidad (geofonos), dependiendo del tipo de aplicación (tabla A.3).
Ubicación sensores	En el suelo cerca a estructuras sometidas a vibraciones y dado el caso sobre la estructura.
Fortalezas	Son lineamentos muy generales basados en principios básicos, que sirven de guía en el momento de elaborar una norma o al realizar un trabajo en el área de vibraciones.
Debilidades	No provee valores indicativos.

Uno de los puntos importantes en este estándar es que la duración de las vibraciones se considera relevante en el problema de vibraciones, lo cual no se ha puesto en practica en las normas, con excepción de la norma Suiza. La ISO tiene en cuenta la duración ya que es aplicable en cualquier investigación o normas de vibraciones con cualquier tipo de fuente.

La forma en la cual este estándar tiene en cuenta la duración de la señal es clasificando la vibración en continua o transitoria. Con este fin se define una constante de tiempo para la cual se presenta resonancia, dada por $\tau_r = 1/(2\pi\xi_r f_r)$; donde τ_r es la constante de tiempo, ξ_r representa la influencia del amortiguamiento y depende del tipo de excitación y f_r es la frecuencia de resonancia. Cuando la vibración es mayor de $5\tau_r$ entonces se considera que la vibración es continua y cuando es menor se considera es transitoria. En el caso de las voladuras ISO considera que se puede considerar como transitoria.

Como se muestra en la tabla 3.9, los sensores preferidos son aquellos que miden cantidades cinemáticas como la aceleración (acelerómetros) y velocidad (geofonos). Dependiendo de la variable que se necesite (Tabla A.3) y del tipo de sensor utilizado, se pueden encontrar valores de la variable considerada a partir de los valores obtenidos en la medición por medio de integración o diferenciación. La ISO recomienda tener cuidado al momento de integrar valores con frecuencias bajas.

En el análisis de señales, la ISO plantea dos casos: 1) si hay suficiente información de las

estructuras a analizar, entonces recomienda realizar el espectro de respuesta y 2) si no hay información de las estructuras entonces recomienda utilizar métodos en el dominio de la frecuencia o del tiempo.

Cuando se realiza análisis de señales en el dominio de las frecuencias, esta norma recomienda utilizar la densidad espectral de potencia o *PSD* (por *Power Spectral Density*, concepto y método que proviene de la ingeniería eléctrica y electrónica) o similares. Para el análisis de las señales en el dominio del tiempo plantea que se pueden utilizar conteo de picos o cruces por cero (que puede ser implementado por el método de la bisección).

3.3.7. Norma Suiza SN 640 315a de 1992

La norma de Suiza fue elaborada para ser aplicada a las vibraciones causadas por: voladuras, maquinaria y tráfico y que pueden causar daño cosmético en la edificación. Al igual la mayoría de las normas de control de vibraciones, no tiene en cuenta: la percepción humana, los daños en equipos delicados, y los efectos en suelos blandos de las vibraciones causadas por las fuentes antes mencionadas.

Esta norma contempla frecuencias desde los 8 hasta los 150 Hz, y establece que por fuera de este rango deben ser estudiadas con base en otras normas y consideraciones. La inclusión del número de solicitaciones –cantidad de vibraciones en la señal– y su correspondiente diferencia en los valores indicativos máximos de velocidad, es la responsable de que esta norma sea realmente aplicable a una amplia gama de vibraciones, y que por lo tanto sea versátil.

Tabla 3.10. Aspectos importantes en la reglamentación Suiza SN 640 315a (1992)

Campo de aplicación	Vibraciones por voladuras, maquinaria, equipo de construcción, tráfico en carreteras y ferroviario.
Variables medidas	Velocidad resultante –de particula– pico [mm/s], frecuencia de la vibración [Hz] relacionada con la componente de máxima velocidad, adicionalmente la cantidad de sacudidas
Valores indicativos	ver tabla C.3 (página 122)
Sensores utilizados	Tres componentes ortogonales de sensores que registren velocidad en mm/s con un rango lineal entre 5 y 150 Hz
Ubicación sensores	Sobre la estructura
Fortalezas	Brinda criterios para definir daño no estructural –fisuras en mampostería –. Define una frecuencia de las solicitaciones

Los valores máximos establecidos en la norma dependen de varios parámetros como la cantidad de solicitaciones y de la susceptibilidad de la edificación, obteniéndose así un rango

amplio de valores indicativos. Esta norma también contempla la posibilidad de cambiar estos valores previa consulta a un experto en el tema.

Según la norma, las mediciones deben realizarse con geofonos, es decir sensores cinemáticos que midan velocidad y que deben tener una respuesta lineal entre 5 y 150 Hz. Prácticamente todos los sismómetros de ingeniería (sensores activos) cumplen con este objetivo. Adicionalmente la norma espera que los sensores sean rutinariamente calibrados con el fin de obtener valores de vibraciones correctos.

El sitio definido por esta norma para instalar los sensores es dentro de la estructura estudiada en los pisos superiores, ya que se espera que bajo esa condición la velocidad de partícula sea superior a la que se registra en la base de la estructura. Sin embargo, en este proyecto no se requiere evaluar los efectos en una estructura en particular, por lo cual las vibraciones fueron registradas en una pequeña zapata ubicada dentro de una caseta.

Para mayor información de la norma se puede consultarse en el Anexo C, sección C.1, página 115.

3.3.8. Norma Sueca SS 460 48 66 1991

La norma sueca tampoco considera las molestias causadas a humanos, ni el riesgo de equipos sensibles a vibración, pues solo contempla el efecto de las vibraciones producidas por voladuras sobre las edificaciones.

Esta norma esta sustentada en cientos o miles de observaciones en el lecho rocoso escandinavo, donde se han podido estimar con buena certeza niveles de daño en las estructuras. Esto ha hecho que la norma tenga en cuenta varios tipos de estructuras geológicas, que otras normas no han tenido en cuenta; sin embargo, el no incluir información de frecuencias y de otras componentes diferentes a la vertical hace que sea desactualizada respecto a los estándares actuales.

Para mayor información sobre esta norma se puede consultar el Anexo C, sección C.2, página 125.

3.4. Implementación de valores representativos

Para la interpretación de los valores obtenidos en términos de su potencial de daños se han calculado niveles indicativos bajo las prescripciones de las diversas normas consideradas en este trabajo. Para aquellas descripciones geológicas y de tipologías constructivas que no coinciden ajustadamente con las condiciones locales, se escogieron las más comparables y, en todo caso, se aplicaron las categorías más "desfavorables" en cuanto al nivel de vibración

Tabla 3.11. Aspectos importantes de la SS 640 315a (Suecia)

Campo de aplicación	Vibraciones por voladuras.
Variables medidas	Velocidad pico vertical [mm/s] y dado el caso la Velocidad de partícula pico [mm/s].
Valores indicativos	Proporciona una multitud de valores indicativos, los cuales se calculan a partir de una ecuación sencilla
Sensores utilizados	Sensor vertical que registre velocidad
Ubicación sensores	Sobre el suelo junto a la estructura de interés.
Fortalezas	La inclusión de la geología y la gran cantidad de valores indicativos que se pueden obtener
Debilidades	Esta sustentado únicamente en mediciones verticales, no tiene en cuenta la frecuencia.

admisible, pero a la vez las más favorables para el sitio expuesto.

Todas las normas fundamentan sus valores indicativos en resultados empíricos, o sea numerosas observaciones de voladuras y daños. Algunas normas son evidentemente - por simple comparación - muy conservativas. Las apreciables diferencias entre los valores indicativos - niveles de velocidad de partícula admisibles, principalmente - se deben seguramente a los diferentes niveles de “riesgo aceptable” en los diferentes países, más que a diferencias en la resistencia de las edificaciones.

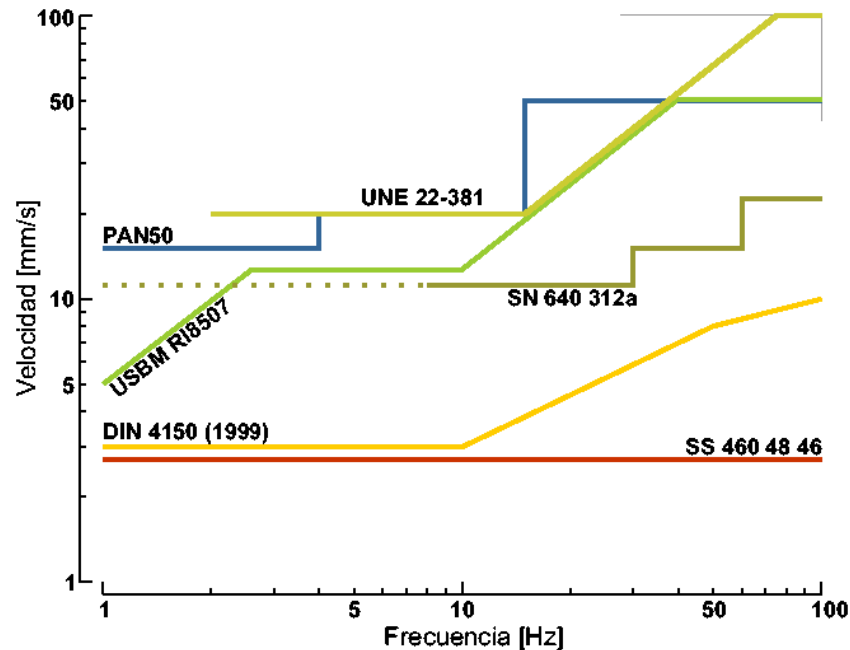
De los dos sitios evaluados: San Marcos y Mulaló, la edificación mas vulnerable se encuentra en esta ultima población y corresponde a una capilla colonial –edificación histórica. Esta edificación esta cimentada sobre depósitos de vertiente relativamente consolidados, adicionalmente ésta iglesia está construida en ladrillo sin ningún sistema estructural –propio de su periodo. Mulaló es también la localidad mas cercana a las voladuras, debido a la mejor calidad de la caliza hacia esta población. Los valores indicativos de las diferentes normas –detallados en las siguientes secciones– aplicadas en este proyecto están resumidas en la figura 3.2.

3.4.1. Valores representativos DIN 4150 de 1999

La primera de las normas DIN 4150 (1975) prescribe valores mas bajos de velocidad –resultante y vertical– que su actualización, adicionalmente incluye en su catalogación límites para “monumentos históricos” (tabla A.2, página 87).

Los valores prescritos por la DIN 4150 de 1975 para este tipo de edificaciones –monumentos históricos– es de 4 mm/s para velocidad resultante máxima y una velocidad vertical máxima entre 2.4 y 4 mm/s. Sin embargo, debido a que esta versión de norma no incluye valores de frecuencias, se utilizó la actualización de 1999.

Figura 3.2. Resumen de velocidades máximas indicativas de las diferentes normas aplicados al caso del mina La Calera



La norma alemana DIN 4150 de 1999 no contempla valores representativos para edificaciones históricas como se explicó anteriormente. Sin embargo, los valores máximos correspondientes al tipo de construcción 3, "edificaciones susceptibles a vibraciones o las no incluidas en las dos anteriores clases" (tabla A.1, página 87), pueden ser aplicados en este proyecto.

Las velocidades resultantes o de partícula de la norma DIN 4150 de 1999 y los rangos de frecuecias correspondientes utilizados son:

1 – 10 Hz → 3 mm/s.

10 – 50 Hz → 3 – 8 mm/s.

50 – 100 Hz → 8 – 10 mm/s.

Esta norma también incluye un valor máximo de componente vertical de 8 mm/s en cualquier frecuencia.

3.4.2. Valores representativos PAN50

La norma escocesa solo tiene en cuenta estructuras de tipo residencial. Los valores representativos se basan en criterios de daño: cosmético, menor o estructural, en este tipo de edificaciones (ver resumen de norma en tabla 3.4 página 24 o la traducción de la norma en la página 127).

El objetivo del proyecto es poder evaluar el cumplimiento con normas internacionales utilizando la situación mas desfavorable, por lo tanto se ha escogido la iglesia de Mulaló por su tipología y cercanía a las voladuras. Ya que la norma no contempla este tipo de estructuras, se ha escogido la situación más desfavorable que corresponde a la velocidad de partícula más pequeña que produce daño cosmético, con valores representativos de:

$<$ **4 Hz** $\rightarrow$ 15 mm/s.

4 – 15 Hz $\rightarrow$ 20 mm/s.

$>$ **15 Hz** $\rightarrow$ 50 mm/s.

3.4.3. Valores representativos del OSM 817.16

Los valores admisibles para velocidades de vibración por voladuras en la minería son especificados a nivel federal en EEUU por el OSMRE (*Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement*), sin embargo, cuando se dispone de monitoreo tanto de la velocidad de vibración (en 3 componentes) como de la frecuencia dominante, como es el caso, los valores límite son los recomendados por la USBM RI8507.

3.4.4. Valores representativos del USBM RI8507

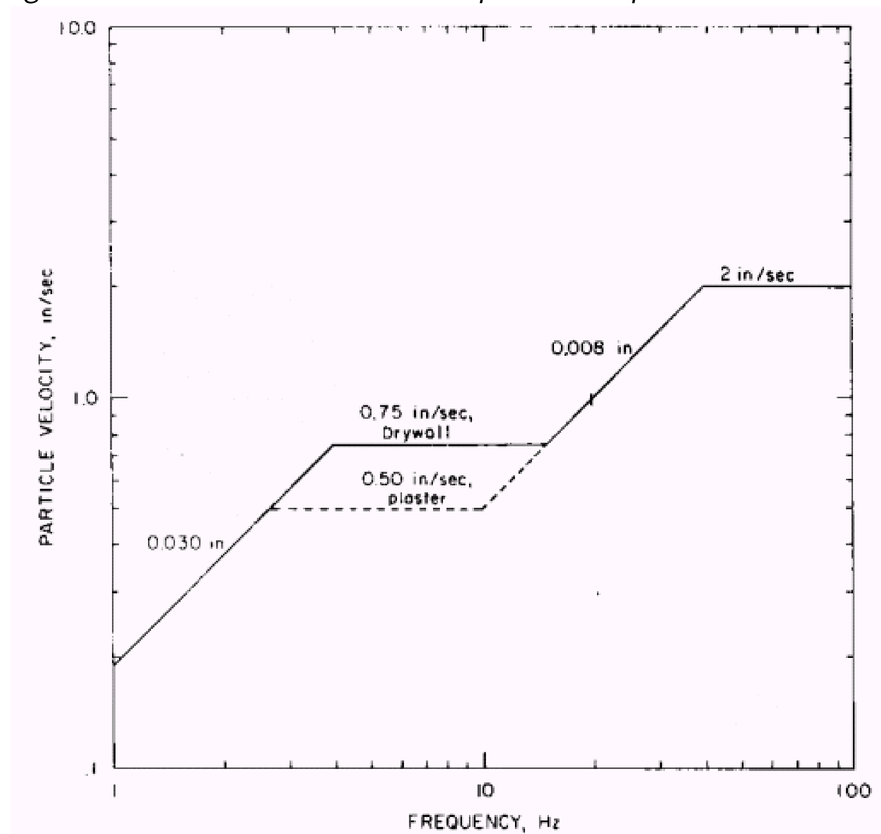
Los limites de velocidad resultante de la USBM RI8507 son exclusivos para edificaciones residenciales, diferenciando valores para viviendas con paredes con yeso y paredes aligeradas, a estas ultimas se les permite mayores velocidades resultantes en el rango de frecuencias aproximadamente entre 4 y 11 Hz (ver figura 3.3).

La catalogación de esta norma que se aproxima al tipo de material de la iglesia Mulaló es la de paredes con yeso, para el cual los valores representativos son:

1 – 2.6 Hz $\rightarrow$ 5 – 12.7 mm/s.

2.6 – 10 Hz $\rightarrow$ 12.7 mm/s.

Figura 3.3. Velocidades de vibración permisibles por la USBM RI8507



10 – 40 Hz $\rightarrow$ 12.7 – 50.8 mm/s.

40 – 100 Hz $\rightarrow$ 50.8 mm/s.

3.4.5. Valores representativos del UNE 22-381-93

La norma UNE de España tiene en cuenta nuestra situación de sitios históricos. El grupo III en la clasificación de estructuras (vea página 136), con el valor pico de velocidad más bajo[1], es el que se utilizara en aquí; sus valores representativos son:

2 – 15 Hz $\rightarrow$ 20 mm/s.

15 – 75 Hz $\rightarrow$ 20 – 100 mm/s.

$>$ **75 Hz** $\rightarrow$ 100 mm/s.

[1]evaluado en la componente con valor mas alto de velocidad

3.4.6. Valores representativos ISO 4866

La ISO presenta métodos para la estandarización de normas, es muy general y no presenta valores representativos que puedan ser utilizados.

3.4.7. Valores representativos de SS 460 48 46

La norma sueca (ver Anexo C.2, página 125) utiliza categorías que no son iguales a aquellas encontradas en el entorno de la cantera de Mulaló, especialmente en lo relacionado con la geología de terrenos (por ejemplo depósitos glaciales) y las características de las edificaciones. Se hace entonces la asociación mas aproximada a las condiciones locales, las que se muestran a continuación.

Velocidad vertical pico no corregida La población Mulaló está localizada sobre depósitos de vertiente relativamente consolidados, que pueden ser considerados como un sustrato intermedio entre las clases "Morrena suelta" (depósitos glaciales sueltos) y "Morrena firme" (tabla C.5, página 126), o sea:

$$v_o = \frac{18 + 35}{2} = 26{,}5 \text{ mm/s}$$

Factor de tipo de construcción La edificación con tipologia constructiva mas desfavorable, como ya se mencionó, es la iglesia de Mulaló, la que es asociable a la categoría 5 ("Edificaciones históricas en condición débil") y por lo tanto

$$F_b = 0{,}5$$

Factor de material de construcción La iglesia de Mulaló es una edificación de mampostería de ladrillo común, sin confinamiento. La clase de material más asociable es la que corresponde a "ladrillo artificial de caliza", que es:

$$F_m = 0{,}65$$

Factor de distancia En todo caso, la distancia entre una voladura en La Calera y cualquier vivienda en Mulaló o San Marcos será superior a los 350 m. Por esto, la norma prevee para edificaciones situadas sobre morrena firme 0.35 y sobre morrena suelta 0.5. Por interpolación se obtiene:

$$F_d = 0{,}42$$

Factor de tiempo de proyecto Para proyectos con duraciones superiores a los 5 años, el valor designado por la norma es:

$$F_t = 0{,}75$$

El nivel de guía para la velocidad vertical máxima es entonces

$$\begin{aligned} v &= 26{,}5 \times 0{,}5 \times 0{,}65 \times 0{,}42 \times 0{,}75 \\ &= 2{,}71 \text{ mm/s} , \end{aligned}$$

ya que esta norma no tiene en cuenta la frecuencia, entonces se asumira que el valor de 2.71 mm/s es constante para todas las frecuencias.

3.4.8. Valores representativos de SN 640 312a

En la tabla C.3 de la norma suiza (sección C.1 en la pág. 115) se dan los valores indicativos para diversos tipos de edificaciones (según su susceptibilidad), cantidad de solicitaciones y rangos de frecuencias dominantes.

Tomando –como en el cálculo anterior– la iglesia de Mulaló como objeto más susceptible, la tabla C.1 (pág. 118) de la norma ubica el caso en la clase 4 ("particularmente susceptible; edificaciones históricas o bajo protección"). La clase de frecuencia de solicitaciones (tabla C.2, pág 121) asociable es la de "ocasionales", porque la norma califica como solicitación (ver pág. 117 – Frecuencia de solicitaciones) aquella que excede el valor indicativo en 0.7 veces, lo que es muy poco probable que ocurra en este tipo de vibraciones de duración finita y corta.

Con lo anterior, los valores escogidos están "entre los valores indicativos de la clase 3 y la mitad de estos", que los valores indicativos son:

$<$ **30 Hz** $\rightarrow (15 + 7\frac{1}{2})/2 \rightarrow$ 11.2 mm/s.

30 – 60 Hz $\rightarrow (20 + 10)/2 \rightarrow$ 15 mm/s.

$>$ **60 Hz** $\rightarrow (30 + 15)/2 \rightarrow$ 22.5 mm/s.

3.5. Reglamentación Nacionales

Como parte de la investigación, se realizó una búsqueda bibliográfica y de normatividad nacional en el manejo de vibraciones por fuentes antrópicas en: ICONTEC, Ministerio de Minas y Energía, IDEAM, Ingeominas y Minercol. En ninguna de estas instituciones ha desarrollado normatividad respecto a este campo.

Sin embargo se han realizado investigaciones aisladas por parte de varios grupos en este tema, en algunas de las cuales se han aplicado los criterios del USBM RI8507 en ausencia de uno nacional. Ingeominas (1996) desarrollo un estudio en la mina Guativas en Une,

Cundinamarca; Universidad de los Andes (Cementos del Valle, 1988, 1992) y el Observatorio Sismológico del SurOccidente (Cementos del Valle, 1999, 2000, 2001, 2002) en la mina la Calera en Yumbo, Valle del Cauca.

Es practica común en algunas instituciones que trabajan en este tema utilizar la NSR-98 (Norma Sismo-resistente Colombiana) para la evaluación de efectos de las voladuras sobre las construcciones, ya que esa norma tiene peso legal. Sin embargo, esta norma no es adecuada para este tipo de trabajos, ya que:

- En la parte relacionada con este tema, la NSR-98 es una norma de diseño de estructuras.
- El periodo de retorno del sismo tipo es de 475 años, el daño *estructural* se presenta por un evento extremo, la estructura se supone esta en buen estado.
- Las voladuras tienen periodos de retorno pequeños (1/2, 1, 2 días, ocasionalmente una semanal o mensual), por lo cual el daño mas bien puede ser por fatiga sobre elementos no estructurales.
- Lo que prevén las normas especificas es que no presente daño *cosmético* debido a las vibraciones, la NSR-98 no proporciona esto.

4. ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES

4.1. Introducción

Las variables que hoy en día se consideran más relevantes en cuanto al efecto que las vibraciones de terreno por voladuras tienen sobre edificaciones son la velocidad máxima de vibración y la frecuencia asociada. La velocidad depende de la energía que porta la onda y que puede ser transmitida a la edificación, mientras que la frecuencia – ciclos de vibración por segundo – determina en parte la eficiencia de la transmisión de energía.

De los dos parámetros: velocidad y frecuencia, el primero (velocidad por componente y resultante) es la más fácil de calcular y los criterios para su selección son pocos. Por otro lado, para calcular la frecuencia existen muchos métodos que pueden ser utilizados y los criterios no están bien unificados aun. Son estas las razones por las cuales se dedica mayor esfuerzo en este capítulo al cálculo de la frecuencia.

Una onda es definida como una función oscilante en el tiempo o espacio que se asemeja a un sinusoide. El análisis de Fourier, que es basado en una transformada (operación que establece formalmente una relación entre dos representationes de un mismo fenómeno), es un análisis de onda. La transformada de Fourier expande señales o funciones en términos de sinusoides o exponenciales complejos. Es usual denominar a esta operación: cambio de dominio del tiempo a frecuencias o viceversa. El análisis de Fourier provee una invaluable herramienta en las ingenierías y ciencias, especialmente para el fenómenos periódicos, estacionarios e invariantes en el tiempo.

En este capítulo se examinaran los diferentes tipos de análisis sugeridos por las normas para medir la velocidad y frecuencia en señales producidas por voladuras. También se plantea un método alternativo para calcular la frecuencia, basado en las nuevas relaciones de tiempo-frecuencia, que se asemejan al procedimiento de cruces por cero planteado en diversas normas (ver tabla A.4, pág. 89).

Al final se presenta el desarrollo que se realiza comúnmente (excluyendo algunos puntos específicos para las relaciones de tiempo frecuencia) para la extracción de información de vibraciones con el fin de ser comparada con las normas internacionales.

4.2. Tipos de análisis

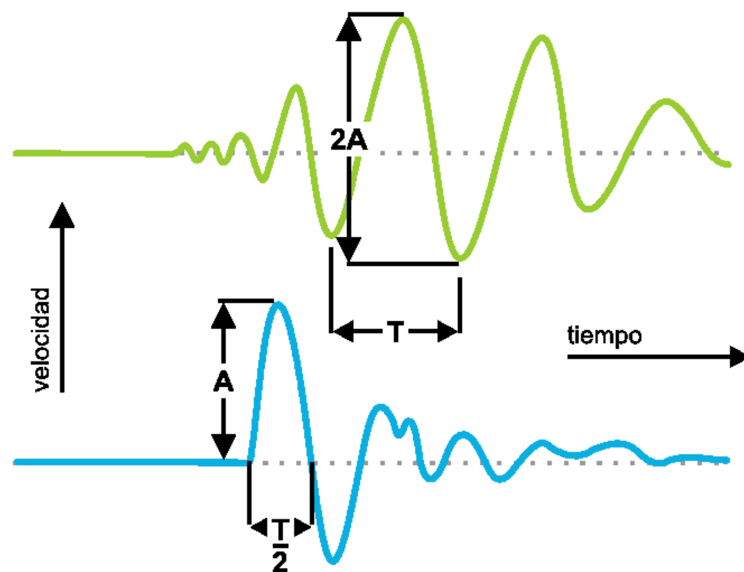
En la literatura relacionada con el manejo y caracterización de vibraciones producidas por voladuras y obras civiles (Por ejemplo OCE, 1972; Bollinger, 1980; USACE, 1989; Dowding,

2001) se encuentran una variedad de técnicas, incluyendo algunas obsoletas, las cuales pretenden calcular la amplitud y frecuencia para ser comparadas con normas o para utilizarlas en investigaciones, estas técnicas pueden ser catalogadas en uno de los siguientes grupos:

1) **Análisis como vibraciones armónicas en registros análogos:** Este grupo asume que el movimiento del suelo causado por una voladura, y registrado en medios análogos, se halla en estado sinusoidal estacionario en el intervalo de interés de la señal (véase Figura 4.1, arriba). La amplitud máxima y la frecuencia asociada puede ser hallada entonces por simple inspección de la señal. Una descripción detallada y ejemplos del método se encuentra en Bollinger (1980) y Dowding (2001).

2) **Análisis como vibraciones transitorias en registros análogos:** Si la primera llegada de vibración es una onda impulsiva y es a la vez el máximo de la señal (ver Figura 4.1 –abajo–), y dado que la curva de magnificación dinámica de los sensores es basada en la respuesta del estado estable del sensor, la información de vibración registrada ha sido transformada; si la señal es análoga y no se puede realizar corrección instrumental, entonces el método utilizado consiste en medir la amplitud y la frecuencia de la señal en el máximo y luego realizar correcciones de las variables por medio de ecuaciones –función de corrección instrumental– preestablecidas para el sensor (Bollinger, 1980).

Figura 4.1. Forma de la onda para el análisis armónico –arriba– y transitorio –abajo– (Adaptado de Bollinger, 1980)



3) Análisis digital de señales: En este grupo se encuentran las técnicas de procesamiento que se aplican a señales digitales con el fin de encontrar algunos parámetros relevantes o para corregir la señal. Entre éstas técnicas están: filtrado, análisis de Fourier, reconocimiento de tipo de ondas, integración y derivación numérica, etc.

4) Respuesta espectral: Este es el mismo método utilizado en dinámica de estructuras, en el cual se encuentra la respuesta máxima de una serie de sistemas estructurales de un grado de libertad bajo el efecto de una vibración temporal; Chopra (2001) es una referencia aconsejable sobre el método, y la aplicación en vibraciones por voladuras se encuentra en Dowding (2001).

El análisis de señales como armónicas y transitorias fueron los tipos de análisis más utilizados cuando las señales se registraban en medios analógicos, en los cuales procedimientos muy elaborados eran impracticables. Estos dos tipos de análisis asumen que las vibraciones producidas por voladuras son o se pueden aproximar a señales armónicas dentro de pequeños intervalos de tiempo de la señal original (Figura 4.1). Las normas internacionales desarrolladas antes de los años 80, y muchas investigaciones básicas sobre el tema, se basaron en señales análogas y usaron este tipo de análisis.

Con la llegada de los computadores digitales, los últimos dos tipos de análisis (procesamiento digital y espectros elásticos de respuesta) se han desarrollado y aplicado cada vez más en el área de manejo y caracterización de señales producidas por voladuras (exceptuando las aplicaciones militares que llevan mucho más tiempo usando estas tecnologías). El uso de computadoras permite mejora la calidad de información, ya que digitalmente se puede eliminar la información que no se desea (ruido), y por que se pueden utilizar técnicas elaboradas como el espectro de Fourier ó el espectro de respuesta. Sin embargo, el uso inexperto de técnicas como el espectro de Fourier puede llevar a conclusiones erradas.

Dado el avance en la tecnología, con sistemas de adquisición que arrojan señales digitales, la tendencia es utilizar técnicas de análisis elaboradas, como el espectro elástico, que relaciona las vibraciones con su efecto en sistemas estructurales y también con daño cosmético (Dowding, 2001), y técnicas de procesamiento digital de señales. Sin embargo es usual disponer de sistemas de adquisición que arrojan valores pico de las variables deseadas, como ejemplos de estos sistemas están los fabricados por Instantel (en internet `http://www.instantel.com`) y Blastronics (en internet `http://www.blastronics.com.au/`), los sistemas de monitoreo elaborados por estas empresas son los preferidos en el sector de la minería.

4.3. Selección del tipo de análisis

Para la selección del tipo de análisis se deben tener en cuenta varios factores, entre los cuales sobresalen: 1) el tipo de instrumentación disponible, esto es si el sistema de registro es análogo o digital, si el sensor mide desplazamiento, velocidad o aceleración; si se registran

las series de tiempo o solamente valores extremos de una variable, 2) la calidad y cantidad de información que se pueda obtener de la voladura como, la magnitud de la carga, la ubicación de ésta, el tipo de explosivo utilizado, etc., 3) Las técnicas cuyos resultados sean comparables con valores incluidos en las normas internacionales, 4) el alcance del proyecto, esto es, si se pretende verificar el acatamiento de una norma especifica ó se buscan relaciones empíricas especificas para el área de estudio.

Las características de este estudio son:

1) Las estaciones instaladas por Cementos del Valle en conjunto con el Observatorio Sismológico del SurOccidente están dotadas de sistemas de adquisición digital de 16 y 18 bits, con sismómetros que tienen respuesta plana en velocidades entre 2 y 100 Hz, registrándose series de tiempo cuando se cumple con el algoritmo de disparo STA/LTA (*Short Term Average — Long Term Average*) ó amplitud umbral; el algoritmo STA/LTA compara el promedio temporal de la amplitud en una ventana pequeña con una ventana larga, cuando este valor supera un umbral se registra un evento.

2) Cementos del Valle proporcionó información básica sobre las voladuras, incluyendo el número de identificación de voladura, sector de explotación, posición de la voladura respecto al sistema local de referencia de la mina La Calera, volumen de caliza explotado (desplazado), cantidad en sacos de 25 kg de ANFO. De estos datos, las más relevantes son posición y cantidad de ANFO, ya que ellos están directamente relacionados con el proceso de la voladura. Otros como el sector y el volumen explotado serían importantes si se deseara tener en cuenta diferencias en el rendimiento debido a diferencias geológicas del macizo explotado.

3) Con el fin de valorar los posibles efectos en construcciones cercanas en términos de las normas internacionales, debe conocerse los métodos bajo los cuales las normas fueron elaboradas y su alcance; algunas solo utilizan los valores de partícula pico sobre la componente vertical para evaluar daños cosméticos en las edificaciones, otras normas recomiendan usar la resultante vectorial –velocidad de partícula–, la frecuencia dominante asociada a las señales ó el periodo asociado a la máxima oscilación, para mayor información sobre el tema véase sección 3 (pág. 19 y un resumen en la tabla A.4 en pág. 89).

4) Los alcances de este proyecto son:

   a. Verificar que las vibraciones generadas por voladuras en la mina La Calera cumplan con las normas internacionales disponibles.

   b. Proponer una técnica de análisis a ser usada en futuras investigaciones de los niveles de vibración generadas por el hombre.

Con los tipos de registros de los sistemas de adquisición digital disponibles en este proyecto es posible realizar cualquier tipo de análisis de los mencionados, ver sección 4.2 (página

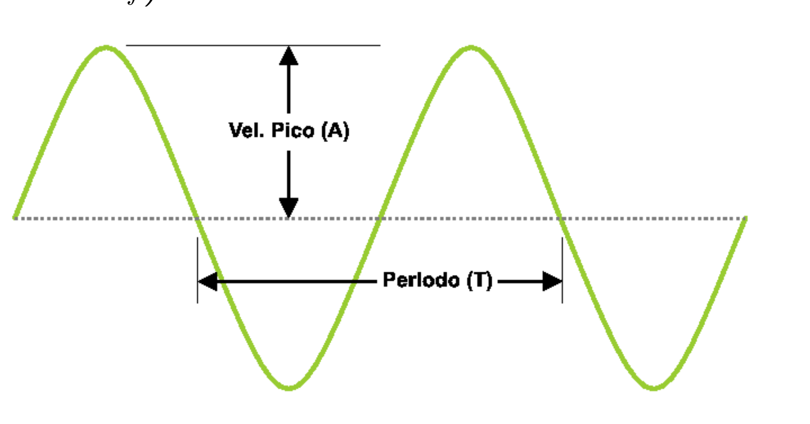
41); sin embargo, no todos estos han sido utilizados en la elaboración de las normas internacionales (alcance 4a.), por lo tanto se escogió un método compatible con las normas y que adicionalmente sirva para lograr el alcance 4b. El método que se escogió esta basado en procesamiento digital de señales y se explica a continuación.

4.4. Generalidades del procesamiento digital de señales utilizado

Generalmente en el análisis de las señales de vibraciones producidas por voladuras se considera una pequeña cantidad de parámetros, de los cuales la velocidad pico en cada componente, la frecuencia asociada a las velocidades pico y máximo de la resultante vectorial de la señal (utilizando el arreglo tridimensional o en las componentes horizontal), son los mas comunes.

Si la señal fuera siempre un sinusoidal perfecto, medir la amplitud (A) y la frecuencia $(f = 1/T)$ seria simple y directo, ya que el movimiento sinusoidal está caracterizado por una amplitud y frecuencia constante (Figura 4.2). Esto no ocurre con los registros de vibraciones producidas por voladuras, donde estas dos variables cambian en función del tiempo y por lo tanto se requiere establecer ciertos criterios para caracterizar la señal.

Figura 4.2. Señal sinusoidal y parámetros que describen el movimiento en este tipo de ondas (amplitud A y frecuencia f)



A continuación se presentan los criterios encontrados en la literatura en el momento de estimar la velocidad pico por componente, la suma vectorial tanto horizontal como resultante y la frecuencia, criterios que son utilizados por las diferentes normas internacionales.

4.4.1. Estimación Velocidad

Bollinger (1980) define cinco factores a tener en cuenta en el momento de escoger valores representativos de velocidad, los cuales son:

1. Las tres componentes del sensor, longitudinal -L-, Vertical -Z- y transversal -E- (Figura 4.3, -b-), representan una descomposición vectorial del movimiento del suelo (Figura 4.3, -a-). Para estimar la magnitud de este vector es necesario medir la amplitud de cada una de las componentes y sumarlas vectorialmente como aparece en la ecuación 4.1 (Figura 4.3, -c-); también es común realizar la suma vectorial de las componentes horizontales (ecuación 4.2), que son las directamente relacionadas con la fuerza cortante en la estructura y con el daño (Figura 4.3, -d-).

   La suma geométrica de amplitudes a partir de las dos o tres componentes es rápida y muy fácil de obtener. Es importante anotar que algunas de las normas internacionales define el criterio de daño a partir de la componente vertical y no de la suma vectorial, para mayor información ver sección 3, (página 19).

2. La máxima amplitud en las componentes individuales puede ocurrir en diferentes posiciones de la señal (a diferentes momentos durante el episodio de vibración). Era usual en otros tiempos hacer combinaciones vectoriales separadas para cada una de las amplitudes máximas, pero con el uso de computadoras este procedimiento ha cambiado; ya no se evalúan únicamente unas pocas sumas vectoriales, sino todas.

3. Con amplitudes y frecuencias cambiando continuamente en la señal debido al arribo de diferentes tipos de ondas (compresionales -*P*-, cortantes -*S*- y de superficie Rayleigh -*R*- y Love -*L*-), se debe estimar donde, o en que segmento, se deben tomar las velocidades en las tres componentes. normalmente se escoge la condición mas adversa que puede ser la máxima velocidad o el periodo mas largo.

4. Hay que tener mucho cuidado cuando se mide la velocidad de cero a pico (A) y cuando se mide la velocidad de pico a pico ($2A$). Para medir la velocidad pico normalmente se calcula la linea base de cada canal (valor medio cero) y con respecto a esta se mide la amplitud máxima o mínima del registro. Sin embargo, si la variación de amplitud no es marcadamente asimétrica, puede ser apropiado estimar este valor midiendo la velocidad de pico a pico y luego tomar como amplitud exactamente la mitad de este valor.

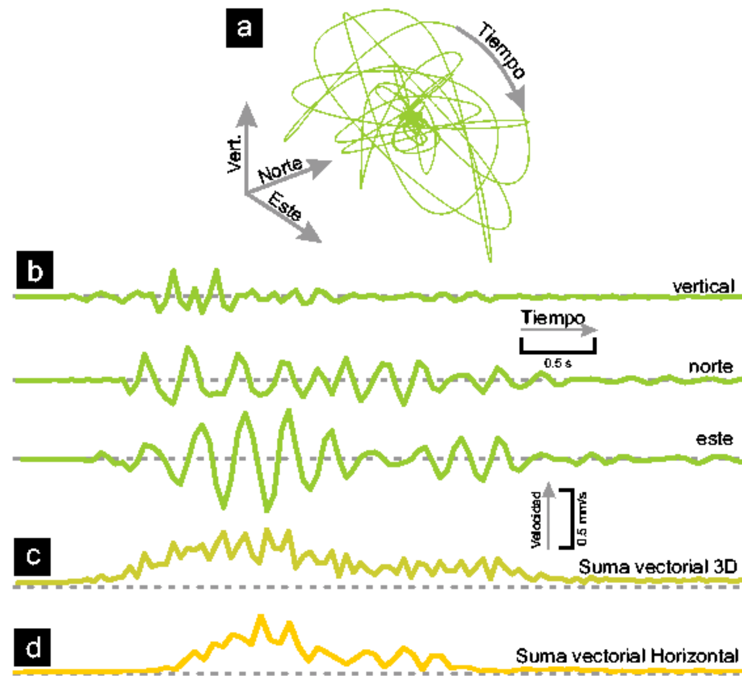
   Usualmente en vibraciones producidas por voladuras se presenta una variación rápida en amplitud, por lo cual la ultima forma de medir la velocidad (pico a pico) debe ser evaluada para cada caso particular con el fin de obtener el valor más representativo del máximo movimiento del suelo.

5. En instrumentación antigua, en la cual los registros son analógicos, las mediciones de amplitud se realizan hasta el centro de la linea (amplitud pico).

Como ya se explico, la suma vectorial, que representa la magnitud del movimiento de la partícula en cada instante de tiempo, es calculada como

$$s_{res}(t) = \sqrt{s_L(t)^2 + s_Z(t)^2 + s_E(t)^2}, \tag{4.1}$$

Figura 4.3. Movimiento de partícula, descomposición y sumas vectoriales de la voladura de la fecha 2000/06/20 grabada a 200 Hz y remuestreada a 6 Hz, -a- movimiento de partícula en tres dimensiones –vertical, norte y este–, el tiempo varia a lo largo del movimiento de partícula; -b- descomposición del movimiento de partícula en las señales tiempo-vertical, tiempo-norte y tiempo-este; -c- suma vectorial –resultante vectorial– de las componentes vertical, norte y este, la suma vectorial es la longitud del vector en la figura -a- desde cero a la posición de la partícula en cada instante; d) suma vectorial de las componentes horizontales –norte y este–.



donde $s_L(t)$ es la señal –velocidades– en la componente longitudinal, $s_Z(t)$ es la vertical y $s_E(t)$ es la transversal, y $s_{res}(t)$ es la magnitud con valores reales y positivos del movimiento de partícula. También es común realizar la suma vectorial de las componentes horizontales (Longitudinal y transversal), que se calcula así:

$$s_{res-h}(t) = \sqrt{s_L(t)^2 + s_E(t)^2} \tag{4.2}$$

Sin embargo, en algunas ocasiones se recurre a la suma vectorial de los máximos de la señal, este valor puede ser calculado así:

$$s_m = \sqrt{\text{máx}(s_L(t))^2 + \text{máx}(s_Z(t))^2 + \text{máx}(s_E(t))^2}, \tag{4.3}$$

donde $\text{máx}(\cdot)$ es una función que encuentra el valor extremo de la señal y s_m es un único valor máximo. s_m es conservativo y mayor al máximo de la suma vectorial, $\text{máx}(s_{res}(t))$.

Las observaciones empíricas de daño cosmético se han realizado con velocidades pico en una sola componente. Las normas utilizan este tipo de observaciones empíricas, y adicionalmente incluyen un factor de seguridad que disminuye los valores máximos. Es por lo tanto más real y aconsejable utilizar la ecuación 4.1 que la 4.3.

En el momento, gracias a datos digitalizados y a las computadoras digitales, encontrar velocidades pico y vectoriales es un proceso sencillo, es sólo una operación euclidiana aplicada a un arreglo de datos.

4.4.2. Estimación de las frecuencias

En la literatura técnica, respecto a estimación de frecuencias en señales de voladuras (por ejemplo en Dowding, 2001; Bollinger, 1980; USACE, 1989) sobresalen tres métodos: 1) Espectro de frecuencias de Fourier, 2) Espectro de respuesta, 3) Periodo respecto a dos ceros consecutivos y otros similares.

Otro método que se ha popularizado y que puede ser incluido en el análisis de frecuencias, pero que no se ha aplicado en esta área (vibraciones por voladuras) son las *wavelets*. Éste tipo de análisis trabaja con conceptos mas amplios que el Espectro de Frecuencia de Fourier, el análisis de Fourier se puede considerar un subconjunto de los *wavelets* (las funciones propias son senos y cosenos), sin embargo, las normas internacionales no han sido desarrolladas con este métodos.

La transformada de Fourier, que caracteriza la señal con su promedio en la ventana de análisis, no permite examinar la variación temporal de las frecuencias; adicionalmente tiene la restricción de que la señal debe ser estrictamente periódica o estacionaria, de otra forma el espectro resultante y las frecuencias obtenidas no tiene mucho sentido físico (Huang et al., 1998).

Debido a las deficiencias y limitaciones de la transformada de Fourier se han creado varias técnicas para estimaciones espectrales, las que tratan de resolver los problemas de esta transformada. En términos generales, la mayoría de las técnicas espectrales se basan en: 1) estimadores espectrales de gran resolución (ver por ejemplo: Percival y Walden, 1993; Gray y Davisson, 1999) o 2) derivaciones de la transformada de Fourier análoga.

Los estimadores espectrales están relacionados con el uso de la transformada de Fourier en pequeñas ventanas de tiempo. En estas técnicas es usual dividir la señal en segmentos que pueden estar traslapados o no, en los cuales la señal es aproximadamente una función armónica (Oppenheim et al., 2000); luego, mediante el uso de una ventana en el dominio temporal (rectangular, triangular, Hamming, Hanning, Blackman, etc.), se aísla un segmento al cual se le calcula la transformada de Fourier, obteniéndose una representación en el dominio de las frecuencias. Estos métodos tienen algunos inconvenientes, entre ellos (Picone

et al., 1988; Coton, 1998; Huang et al., 1998; Rossberg, 2002):

- No proveen información precisa de la variación de las frecuencias en el tiempo, pues su resolución temporal está asociada con la longitud de las ventanas usadas.
- Se presenta distorsión en los picos de frecuencia cuando se cambian las propiedades de la ventana (ancho y fase).
- Se presenta distorsión ante la presencia de una señal no estacionaria, es decir se producen armónicos ficticios en el espectro.
- Con el fin de localizar un evento en el tiempo el ancho de la ventana debe ser angosto, reduciendo la resolución frecuencial de la señal (Principio de Heisenberg–Gabor).

El otro tipo de análisis, el espectro de respuesta, que ha sido recomendado por Dowding (2001) y se plantea como un método valido en normas como la española (UNE 22-381-93), no ha sido utilizado para la elaboración de esta (UNE 22-381-93) u otras normas, y que por lo tanto no se puede comparar con los datos experimentales con los que se han producido las normas.

Debido a los problemas que tiene la transformada de Fourier y su versión para señales muestreadas, la DFT (por sus siglas del inglés *Discrete Fourier Transform*), al igual que cuando se realiza ventaneo y DFT, también debido a la falta de información experimental que correlacione daños con vibraciones producidas por voladuras y el espectro de respuesta, se buscaron métodos que:

1. Estimen la frecuencia en un punto determinado de la señal con una buena aproximación,
2. que cumpla con los procedimientos utilizados en la elaboración de las normas internacionales pertinentes, y
3. no generen distorsión en la parte no estacionaria de la señal, es decir que sea aplicable a ondas no estacionarias.

Exceptuando los *wavelets*, que funcionan bien en señales no transitorias pero son difíciles de interpretar en términos de frecuencias, se encontraron dos métodos que pueden servir para el análisis de las señales registradas debidas a las voladuras; estos son:

Filtros variantes en frecuencia (FVF): Tienen como función aislar las componentes de vibración dentro de bandas frecuenciales angostas, para medir en ellas valores máximos

de velocidad y estimar un espectro de amplitudes máximas. Esta técnica es ampliamente utilizada en el análisis de amplitudes de ondas superficiales (Herrman, 1973; Russell et al., 1988).

Análisis de señal compleja: Este método es una derivación de la transformada de Fourier análoga, en el cual se realiza una separación del contenido de fase y amplitud de la señal. A partir de esta información se puede estimar la frecuencia instantánea, que es una medida de la tendencia central de la frecuencia en el espectro de frecuencias (Barnes, 1993b, 1998).

El método FVF tiene el inconveniente de cambiar la no transitoriedad de la señal. En él, la medición de máximos se realiza solo sobre una banda angosta de frecuencias, pero el máximo de la señal puede deberse a una suma de contribuciones de varias frecuencias.

El método de análisis de señal compleja, basado en la distribución tiempo-frecuencia, provee información detallada del parámetro frecuencia; la no trasitoriedad de la señal no es eliminada en el análisis. Este tipo de análisis es muy utilizado en el área de ingeniería electrónica y eléctrica y es uno de los temas de mayor debate en las revistas técnicas *Transactions on Signal Processing* y *Signal Processing Letters* de la Sociedad de Procesamiento de Señales de la IEEE (de las siglas en inglés *Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Este tipo de análisis tiene limitaciones, las cuales se tratarán en la sección 4.5.5 (página 61).

4.5. Análisis de señal compleja

Este tipo de análisis no es nuevo. Su primera implementación en 1931 se usó en la modulación y demodulación de transmisión FM, luego en procesamiento digital de señales (Oppenheim y Shafer, 1972) y actualmente es usado en prospección sísmica para visualizar cambios de impedancia en el subsuelo (Taner et al., 1979).

En Ingeniería Civil se encuentran aplicaciones en el campo de dinámica, como en la detección del daño estructural, buscando cambios en la frecuencia natural instantánea y asumiendo que estos ocurren debido a diferencias en las propiedades de la estructura antes y después del daño (Bernal y Gunes, 2000). Otra aplicación es en la solución analítica de sistemas dinámicos no lineales, en ésta no se utiliza una señal sino una función, la cual es transformada a la función analítica que puede resolverse fácilmente (Feldman, 1993a,b, 1997; Braun y Feldman, 1997).

El principal objetivo del análisis de la señal compleja, en este proyecto, es estimar los valores de fase, frecuencia y ancho de banda para cada instante de la señal, valores que White (1991) les llama atributos instantáneos de la señal. Esta técnica también permite estimar otros parámetros como: simetría, kurtosis (dispersion de la señal), calidad de la frecuencia instantánea y frecuencia dominante instantánea (Steeghs y Drijkoningen, 2001); y también

puede ser utilizado para refinar la evaluación de: correlación cruzada, medición de tiempos de arribo, conjugada de la convolución, suma de series de tiempo, producto de series de tiempo, correlación y semblanza (Taner et al., 1979).

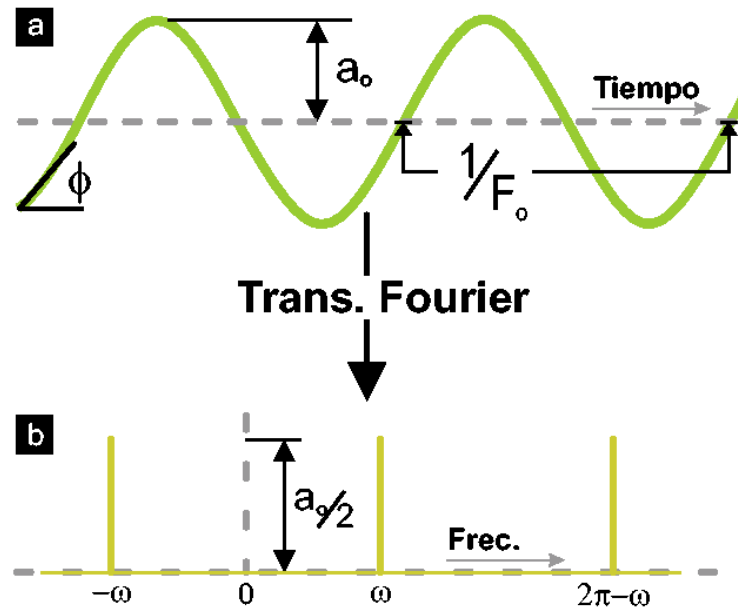
4.5.1. Señal compleja

Una señal sísmica puede ser vista como una superposición de componentes armónicas. La señal sísmica más simple tiene la forma

$$s(t) = a_o \cos(\omega_o t + \phi) \tag{4.4}$$

(Figura 4.4 a), donde el termino ω_o es la frecuencia angular (o $\omega_o = 2\pi f_o$), ϕ es la fase inicial y a_o es la amplitud.

Figura 4.4. Señal armónica y la magnitud de su espectro, -a- parámetros que caracterizan la señal armónica las cuales son: frecuencia f_o, fase inicial ϕ y amplitud a_o; en el caso continuo (ecuación 4.4) la señal existe para todo los valores de t; -b- espectro de Fourier (magnitud) de la señal en a., la magnitud de las frecuencias el caso continuo es $a_o/2$ en $-\omega$ y ω y 0 en cualquier otro caso, para señales discretas es $a_o/2$ para todo ω_o y $2\pi - \omega_o$ y 0 para cualquier otro caso (repitiéndose más allá de la frecuencia de Nyquist esta secuencia).



Aplicando la transformada de Fourier a la ecuación 4.4, se convierte la serie de tiempo $s(t)$ a una serie de frecuencias $S(i\omega)$ aplicando $s(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} S(i\omega)$, obteniéndose $a_o e^{\delta(\omega-\omega_o)+\delta(\omega+\omega o)}/2$,

donde $\delta(\cdot)$ es la función delta definida para el caso continuo (función impulso en el caso discreto) toma el valor 1 cuando $\omega = \pm\omega_o$ y 0 para cualquier otro valor de ω; por lo tanto, en cualquier instante de tiempo esta señal está descrita por dos frecuencias ($\pm\omega_o$, Figura 4.4 b), que llevaría a pensar que la señal esta constituida por dos componentes armónicas, una con frecuencia positiva y la otra negativa o por dos positivas en ω_o y $2\pi - \omega_o$ para el caso discreto (la secuencia por encima de la frecuencia de Nyquist se repite).

El artificio resultante de aplicar la transformada de Fourier sobre la señal de tiempo (tener dos componentes armónicas de la señal) puede ser evitado reemplazando la componente armónica (ecuación 4.4) por un exponente complejo (Scheuer y Oldenburg, 1988), obteniendo

$$\hat{s}(t) = a_o e^{i(\omega_o t + \phi)}, \tag{4.5}$$

donde la unidad imaginaria, i, esta definida como $\sqrt{-1}$ y $\hat{s}(t)$ es la señal definida en el plano complejo, a esta señal se le llama señal compleja.

La anterior ecuación (4.5) puede ser expresada en términos de variable compleja generalizando la formula de Euler, $e^{i\omega_o t} = \cos(\omega_o t) + i\sin(\omega_o t)$, de la forma $\hat{s}(t) = s(t) + is^*(t)$, donde $s(t)$ y $s^*(t)$ son secuencias reales. En señales de tiempo continuo $\hat{s}(t)$ es una función analítica (cumple con las condiciones de Cauchy-Riemann) y a las series de tiempo se les denominan señales analíticas o complejas. La parte real de la señal compleja es la señal original ($\Re\{\hat{s}(t)\} = s(t)$) mientras la conjugada o parte imaginaria ($\Im\{\hat{s}(t)\} = s^*(t)$) es determinada a partir de un desplazamiento en fase de 90°. En el caso de la función coseno la conjugada es la función seno, para señales no armónicas se utiliza la transformada de Hilbert (véase Anexo D Transformada de Hilbert, página 147).

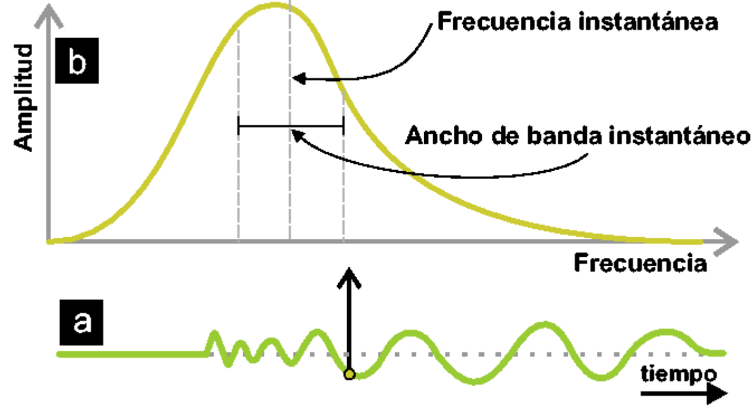
La transformada de Fourier de la Ecuación 4.5 es simplemente $a_o e^{i\phi\delta(\omega-\omega_o)}$; la frecuencia angular (ω_o) ahora solo tiene un valor y la frecuencia instantánea puede ser hallada a partir de la derivada de la fase ($\omega_o t + \phi$) en la representación compleja de la señal, lo que se explica a continuación.

4.5.2. Frecuencia instantánea

La frecuencia instantánea es interpretada en el contexto de análisis de señales en tiempo-frecuencia como la evolución temporal de frecuencia en la señal (Flandrin y Stockler, 1999). Desde el punto de vista probabilístico Loughlin y Tacer (1997) y Barnes (1993a) muestran que la frecuencia instantánea es el primer momento o media de la densidad espectral de la señal en un instante de tiempo (véase figura 4.5).

Como se vió anteriormente la señal compleja puede ser expresada de la forma $\hat{s}(t) = s(t) + is^*(t)$ (véase figura 4.6 -a-), una representación más adecuada para el problema en este proyecto es en términos de la magnitud y fase, con lo cual la representación de la señal

Figura 4.5. Diagrama de una señal y un espectro hipotético en un instante de tiempo, en -a- se muestra la señal en el dominio del tiempo, en -b- el espectro de la señal marcado con un punto, donde se puede observar la frecuencia instantánea como valor medio del espectro y la del ancho de banda instantáneo como la desviación estándar de los datos respecto a la media.



compleja es

$$\hat{s}(t) = A(t)e^{i\theta(t)}. \tag{4.6}$$

Si los términos reales de la señal compleja ($s(t)$ y $s^*(t)$) son conocidos o se pueden calcular, entonces se puede encontrar la magnitud (amplitud o envolvente), $A(t)$, y la fase instantánea, $\theta(t)$ (véase fig 4.6 -b-), de la señal como

$$A(t) = \sqrt{s^2(t) + s^{*2}(t)} = |S(t)| \quad \text{y} \tag{4.7}$$

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{s^*(t)}{s(t)}\right). \tag{4.8}$$

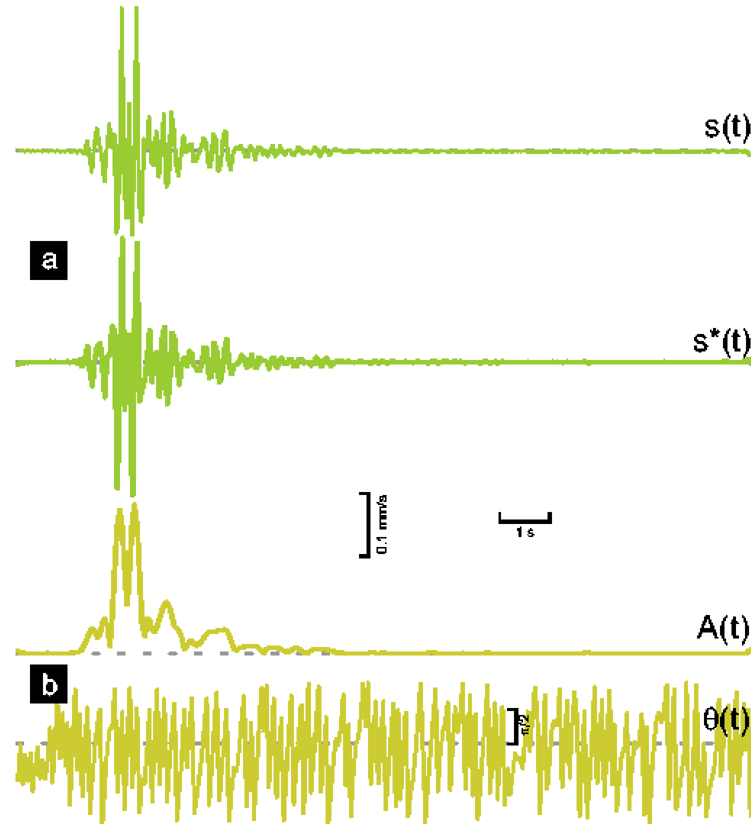
La variación de la fase en el tiempo está relacionada con la frecuencia angular de la señal y es denominada frecuencia angular instantánea (Taner et al., 1979). Expresado de otra forma, la frecuencia angular instantánea es la derivada respecto al tiempo de la fase, es decir,

$$\frac{d}{dt}\,\theta(t) = \omega(t). \tag{4.9}$$

En muchos casos, incluyendo el de este proyecto, se necesita la frecuencia (cantidad de ciclos por unidad de tiempo), envés de la frecuencia angular (radianes por unidad de tiempo), para lo cual se utiliza la relación entre frecuencia angular y frecuencia, $f = \omega/2\pi$, con la cual se obtiene la relación

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d}{dt}\,\theta(t). \tag{4.10}$$

Figura 4.6. Señal compleja -a- y representación en magnitud y fase -b- de la señal de la componente vertical de la voladura de la fecha 2000/06/20, la señal originalmente muestreada a 200 Hz, fue remuestreada a 20 Hz.



Dado que una función solo es derivable si es continua, y que $\theta(t)$ esta relacionada con la función arcotangente, definida en el intervalo $[-\pi/2, \pi/2]$, la función $\theta(t)$ es incierta y no es diferenciable fuera de ese intervalo. Una técnica que permite eliminar el uso de la fase en la evaluación de la frecuencia instantánea consiste en reemplazar la ecuación 4.8 en 4.10 y expandir la ecuación diferencial, de lo cual se obtiene

$$f_t(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{s(t)\frac{d\, s^*(t)}{dt} - s^*(t)\frac{d\, s(t)}{dt}}{s^2(t) + s^{*2}(s)} \tag{4.11}$$

(Taner et al., 1979).

Al calcular la frecuencia instantánea de esta forma se puede presentar que en señales muestreadas se den frecuencias hasta la frecuencia de Nyquist; también se presenta el inconveniente de requerir dos diferenciaciones, una para la parte real y otra para la conjugada

de la señal compleja. Para resolver el problema de la doble diferenciación se han planteado varios métodos de los cuales se mostrara el de Claerbout (1992) y Barnes (1992).

El desarrollo de Claerbout (1992) parte de la ecuación de señal en términos del exponencial complejo (ecuación 4.6), a la cual se aplica logaritmo natural en ambos lados con el fin de eliminar el exponencial, obteniéndose

$$\begin{aligned} \ln(\hat{s}(t)) &= \ln(A(t)) + ln(e^{i\theta(t)}) \\ &= \ln(A(t)) + i\theta(t), \end{aligned} \tag{4.12}$$

por lo tanto la fase instantánea para este caso solo depende de la conjugada del logaritmo de la señal compleja, es decir $\theta(t) = \Im\{\ln(\hat{s}(t))\}$, y la frecuencia instantánea puede ser calculada como

$$f_c(t) = \frac{1}{2\pi}\Im\left\{\frac{d}{dt}\ln(\hat{s}(t))\right\} = \frac{1}{2\pi}\Im\left\{\frac{1}{\hat{s}(t)}\frac{d\,\hat{s}(t)}{dt}\right\} = \frac{1}{2\pi}\Im\left\{\frac{s^*(t)\frac{d\hat{s}(t)}{dt}}{s^*(t)\hat{s}(t)}\right\}. \tag{4.13}$$

La derivada respecto al tiempo de la señal compleja en la ecuación anterior (4.13) puede ser reemplazada por términos en diferencias. Reagrupando y organizando se obtiene

$$f_c(t) = \frac{2}{\pi T}\left[\frac{\hat{s}(t+T) - \hat{s}(t)}{\hat{s}(t+T) + \hat{s}(t)}\right] \tag{4.14}$$

(Claerbout, 1976).

Escribiendo en una forma práctica la ecuación anterior, es decir representandola de una forma útil para ser programada en un computador utilizando las secuencias reales de la señal, se obtiene que la frecuencia instantánea está dada por

$$f_c(t) = \frac{2}{\pi T}\left[\frac{s(t)s^*(t+T) - s(t+T)s^*(t)}{(s(t)+s(t+T))^2 + (s^*(t)+s^*(t+T))^2}\right]. \tag{4.15}$$

En esta ecuación la frecuencia instantánea esta corrida media muestra hacia adelante, $t+T$, y se pueden presentar valores de frecuencia mayores a los de Nyquist si el cambio de amplitudes en la señal es brusco.

La otra aproximación para encontrar la frecuencia instantánea a partir de la ecuación 4.10, descrita por Barnes (1992), consiste en suavizar los valores obtenidos con el promedio temporal de esta en un intervalo de tiempo entre t y $t+T$, así:

$$f_a(t) = \frac{1}{T}\int_t^{t+T} f(\tau)\, d\tau. \tag{4.16}$$

Sustituyendo la definición de de frecuencia instantánea (ecuación 4.10) en la ecuación anterior (ecuación 4.16) se obtiene

$$f_a(t) = \frac{\theta(t+T) - \theta(t)}{2\pi T}. \tag{4.17}$$

Esta ecuación se puede aplicar directamente a registros digitales cuyo intervalo de muestreo es T. Una ventaja que tiene la representación anterior es que el valor obtenido de la frecuencia instantánea no puede ser mayor a la frecuencia de Nyquist, ya que la diferencia máxima en la fase solo puede ser π (Barnes, 1992). La ecuación 4.17 puede ser simplificada, pues como ya se había dicho, la fase instantánea puede ser escrita como $\theta(t) = \Im\{\ln(\hat{s}(t))\}$, y reemplazada en la ecuación 4.17 se obtiene

$$\begin{aligned} f_a(t) &= \frac{1}{2\pi T}\left[\Im\{\ln(\hat{s}(t+T))\} - \Im\{\ln(\hat{s}(t))\}\right], \\ f_a(t) &= \frac{1}{2\pi T}\Im\left\{\ln\left[\frac{\hat{s}(t+T)}{\hat{s}(t)}\right]\right\}, \\ f_a(t) &= = \frac{1}{2\pi T}\arg\left[\frac{\hat{s}(t+T)}{\hat{s}(t)}\right]. \end{aligned} \tag{4.18}$$

Para expresar computacionalmente la ecuación 4.18, utilizando división compleja, podemos escribir:

$$f_a(t) = \frac{1}{2\pi T}\arctan\left[\frac{s(t)s^*(t+T) - s(t+T)s^*(t)}{s(t)s(t+T) + s^*(t)s^*(t+T)}\right]. \tag{4.19}$$

Barnes (1992) plantea además otra ecuación empleando un diferenciador *FIR* (por *Finite Impulse Response*, Respuesta de Impulso Finita) de tres puntos. Este diferenciador no introduce desplazamiento en el tiempo y utiliza una integral entre una muestra de tiempo anterior y una posterior, este tipo de diferenciador y su aplicación al problema utilizando la ecuación 4.10 se muestra a continuación:

$$f_b(t) = \frac{1}{2\pi T}\int_{t-T}^{t+T} f(\tau)\, d\tau = \frac{\theta(t+T) - \theta(t-T)}{4\pi T}, \tag{4.20}$$

esta ecuación se puede transformar en términos de la señal compleja como

$$f_b(t) = \frac{1}{4\pi T}\Im\left\{\ln\left[\frac{\hat{s}(t+T)}{\hat{s}(t-T)}\right]\right\},$$

que en forma computacional se expresa de la siguiente forma:

$$f_b(t) = \frac{1}{4\pi T}\arctan\left[\frac{s(t-T)s^*(t+T) - s(t+T)s^*(t-T)}{s(t-T)s(t+T) + s^*(t-T)s^*(t+T)}\right]. \tag{4.21}$$

Esta ultima ecuación (4.21) tiene como ventaja ser simétrica respecto a un punto central, lo cual no introduce desplazamiento en el tiempo. Sin embargo, esta representación sigue

teniendo el inconveniente de presentar frecuencias por encima de la de Nyquist cuando hay cambios bruscos en los valores de la variable observada en el intervalo de suavizado $t - T$ a $t + T$.

4.5.3. Ancho de banda instantáneo

La frecuencia instantánea esta relacionada directamente con la frecuencia media de la densidad espectral de la señal en un instante de tiempo, la densidad espectral en estos casos generalmente se asume Gaussiana, y desde este punto de vista es natural hablar de la desviación estándar de la frecuencia instantánea, a la cual se le llama ancho de banda instantáneo (figura 4.5). Tanto la frecuencia instantánea como el ancho de banda instantáneo son momentos condicionales de bajo orden en la densidad espectral que varia con el tiempo (Loughlin y Davidson, 2000).

La forma exacta de la densidad espectral asociada con los valores de frecuencia instantánea (valor esperado) y ancho de banda instantáneo (desviación estándar) no es conocida; sin embargo, según Barnes (1993a) no hay necesidad de conocer la forma de la densidad espectral si se cumplen dos condiciones: 1) que la frecuencia central instantánea y la frecuencia instantánea sean la misma, 2) que el ancho de banda espectral sea siempre real y positivo. Cuando se cumplen las anteriores condiciones el ancho de banda instantáneo, $\sigma_f(t)$, se define a partir de la señal compleja (ecuación 4.6) como

$$\sigma_f(t) = \left[\frac{A'(t)}{2\pi A(t)}\right] = \left|\frac{d}{dt}\ln(A(t))\right|, \tag{4.22}$$

donde $A(t)$ es la amplitud instantánea o envolvente de la señal y $A'(t)$ es la derivada respecto al tiempo. El ancho de banda instantáneo según la ecuación anterior (4.22) es una medida de la tasa de cambio relativa de la amplitud con el tiempo. Por medio de un sencillo análisis dimensional podemos darnos cuenta que $\sigma_f(t)$ esta expresado en dimensiones de $[T^{-1}]$ y tiene unidades de frecuencia que pueden ser expresadas en Hertz.

Si se tiene la amplitud instantánea se puede calcular el ancho de banda directamente aplicando una diferenciación (ecuación 4.22). Para aplicar este procedimiento se puede utilizar diferenciadores tipo FIR sobre la amplitud (envolvente) instantánea, con diferenciadores de dos (ecuación 4.16) y tres puntos (ecuación 4.20) para obtener resultados congruentes con los de la frecuencia instantánea. Para obtener una ecuación que pueda ser utilizada en computadora se expresa la solución en términos de las secuencias reales de la señal compleja, es decir utilizando la señal, $s(t)$, y su conjugada, $s^*(t)$.

Empleando un diferenciador de dos puntos sobre la parte derecha de la ecuación 4.6 se obtiene el ancho de banda en términos de la envolvente de la señal como

$$\sigma_{f_a}(t) = \frac{1}{2\pi}\left|\frac{\ln(A(t+T)) - \ln(A(t))}{T}\right|,$$

y esta ecuación en términos de las secuencias reales de la señal compleja es

$$\sigma_{f_a}(t) = \frac{1}{4\pi T}\left|\ln\left[\frac{s^2(t+T)+s^{*2}(t+T)}{s^2(t)+s^{*2}(t)}\right]\right| \tag{4.23}$$

(Barnes, 1992).

Esta ecuación (4.23) introduce un corrimiento de media muestra al igual que su homóloga, la frecuencia instantánea.

Utilizando un diferenciador de tres puntos sobre la amplitud instantánea se obtiene el ancho de banda como

$$\sigma_{f_b}(t) = \frac{1}{2\pi}\left|\frac{\ln(A(t+T)) - \ln(A(t-T)}{2T}\right|,$$

y su representación con los valores de señal compleja sera entonces

$$\sigma_{f_b}(t) = \frac{1}{8\pi T}\left|\ln\left[\frac{s^2(t+T)+s^{*2}(t+T)}{s^2(t-T)+s^{*2}(t-T)}\right]\right|. \tag{4.24}$$

(Barnes, 1992).

4.5.4. Implementación del análisis de señal compleja

El análisis de señal compleja en este proyecto tiene como fin, como ya se mencionó, calcular valores de frecuencia en un punto o intervalo (donde se presente la máxima velocidad). Adicionalmente, el método escogido es compatible con las diferentes normas internacionales y sirve en la formulación de relaciones empíricas que involucran frecuencia y otras variables del proceso de la voladura.

En secciones anteriores se mostraron varios métodos para calcular la frecuencia instantánea y el ancho de banda instantánea. En la tabla 4.1 se hace un compendio las ecuaciones para calcular la frecuencia instantánea y el ancho de banda instantáneo, de las cuales se escogerá un par para su aplicación en este proyecto.

Analizando las ecuaciones en la tabla resumen (4.1) se pueden apreciar algunos inconvenientes, esencialmente en la forma de calcular la frecuencia instantánea. Uno de los problemas aparece en el cálculo de la frecuencias f_a y f_b, para lo cual se utiliza la función arcotangente que esta definida en el intervalo $[-\pi/2, \pi/2]$; si se aplican las ecuaciones sin prever esta discontinuidad se presentara repetición cíclica cuando las frecuencias en la señal son superiores a $1/4T$ para f_a (figura 4.7 -b-) y $1/8T$ para f_b (figura 4.7 -c-). Este problema puede ser superado si se interpola la señal por lo menos a 4 veces la frecuencia de muestreo para f_a y 8 para f_b (figura 4.8), este cambio en la frecuencia de muestreo no produce distorsión en el espectro, únicamente hace que la señal pase a ser de banda estrecha.

Tabla 4.1. Resumen de las ecuaciones utilizadas en el calculo de parámetros frecuencia y ancho de banda instantáneos.

Ecuación	Descripción
$f_c(t) = \frac{2}{\pi T}\left[\frac{s(t)s^*(t+T)-s(t+T)s^*(t)}{(s(t)+s(t+T))^2+(s^*(t)+s^*(t+T))^2}\right]$	(ec. 4.15, pág. 54) Frecuencia instantánea según Claerbout (1976).
$f_a(t) = \frac{1}{2\pi T}\arctan\left[\frac{s(t)s^*(t+T)-s(t+T)s^*(t)}{s(t)s(t+T)+s^*(t)s^*(t+T)}\right]$	(ec. 4.19, pág. 55) Frecuencia instantánea utilizando un FIR de dos puntos (Barnes, 1992).
$f_b(t) = \frac{1}{4\pi T}\arctan\left[\frac{s(t-T)s^*(t+T)-s(t+T)s^*(t-T)}{s(t-T)s(t+T)+s^*(t-T)s^*(t+T)}\right]$	(Ec. 4.21, página 55) Frecuencia instantánea utilizando un FIR de tres puntos (Barnes, 1992).
$\sigma_{f_a}(t) = \frac{1}{4\pi T}\left\|\ln\left[\frac{s^2(t+T)+s^{*2}(t+T)}{s^2(t)+s^{*2}(t)}\right]\right\|$	(ec. 4.23, pág. 56) Ancho de banda instantáneo con FIR de dos puntos (Barnes, 1992).
$\sigma_{f_b}(t) = \frac{1}{8\pi T}\left\|\ln\left[\frac{s^2(t+T)+s^{*2}(t+T)}{s^2(t-T)+s^{*2}(t-T)}\right]\right\|$	(ec. 4.24, pág. 57) ancho de banda instantáneo usando FIR de tres puntos (Barnes, 1992).

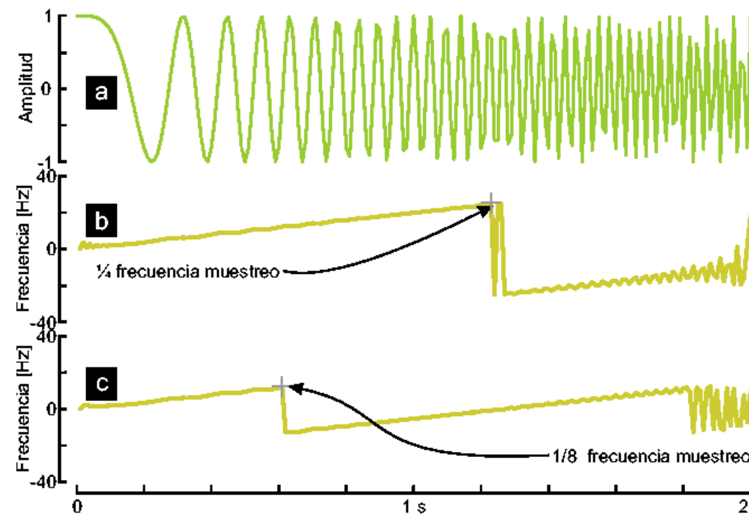
La ecuación 4.15 –Aproximación de Claerbout– puede tener valores de frecuencia instantánea superiores a la frecuencia de muestreo cuando los cambios son muy rápidos o desviaciones de la frecuencia instantánea respecto a la frecuencia real de la señal cuando la frecuencia de muestreo es baja.

Para observar el comportamiento anómalo de la ecuación de Claerbout respecto a la desviación de la frecuencia instantánea, se planteó un experimento (figura 4.9) con señales chirp lineales[1]. Cuando se calculo al frecuencia instantánea con la señal chirp muestreada a 100 Hz (como la figura 4.7 -a-), resulto la frecuencia instantánea desviada respecto a la frecuencia instantánea teórica. Este problema desapareció al aumentar la frecuencia de muestreo –interpolación– a 1000 Hz (Figura 4.9 señal oscilante respecto a la frecuencia instantánea teórica).

El poco control sobre los valores de frecuencia instantánea calculados con la ecuación 4.15 –Aproximación de Claerbout–, hace que este método no sea utilizado en este proyecto.

[1]En términos generales una función chirp es un coseno cuyas propiedades cambian con la variable independiente (p.e: tiempo – t). La función chirp esta definida como $y(t) = A(t)\cos f_i(t)t$, donde $A(t)$ es la amplitud y $f_i(t)$ es la frecuencia, ambas variantes con tiempo. Para el caso lineal y utilizado aquí, $f_i(t) = f_0 + \beta t$ donde $\beta = (f_1 - f_0)/t_1$ y $A(t) = 1$ y f_0 la frecuencia inicial y f_1 es la frecuencia en el tiempo t_1

Figura 4.7. Señal chirp y repetición cíclica de la frecuencia instantánea -a- señal chirp muestreada a 100 Hz (f_m) con incremento lineal de 0 a 40 Hz en 2 s; -b- frecuencia instantánea a partir de ec. 4.19 presenta repetición cíclica cuando la frecuencia de la señal es mayor a 25 Hz ($f_m/4$); -c- frecuencia instantánea calculada con ec. 4.21 presenta repetición cíclica cuando la frecuencia de la señal es mayor a 12.5 Hz ($f_m/8$).



Con el método de Barnes (1992) la frecuencia instantánea (ecuación 4.21 — FIR de tres puntos), y el ancho de banda instantáneo (ecuación 4.24), presenta valores altos y cambios de fase abruptos cuando hay cambios marcados en el tipo de ondas, comparado con la frecuencia instantánea de la ecuación 4.19, (figura 4.10, valores altos en -c- y bajos en -b-). Por este motivo se escogió la ecuación de dos puntos para la aplicación de frecuencia instantánea en este proyecto.

El esquema general utilizado para calcular los parámetros frecuencia instantánea y ancho de banda instantáneo es el siguiente:

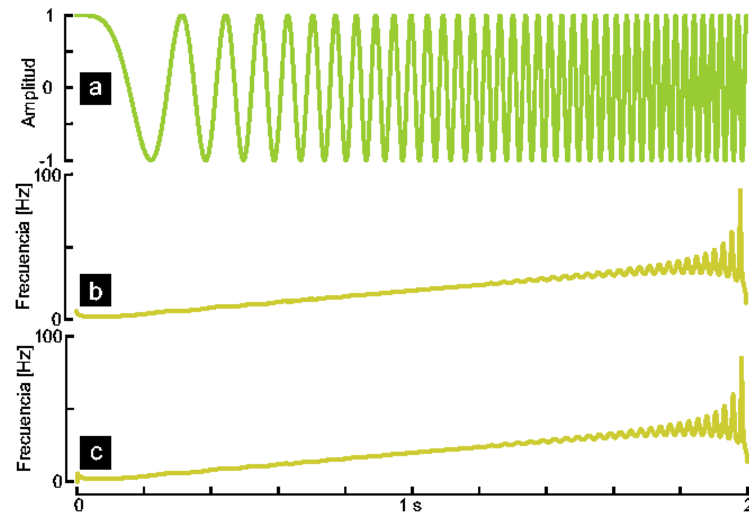
1. Generación o lectura de datos. Se generaran señales sintéticas (de tipo armónico, chirp, etcetera) para ver el comportamiento de los parámetros o se leen los archivos con información de vibraciones producidas por voladuras.

2. Remuestreo de la señal

3. Corrección de linea base y eliminación de ruido por inducción eléctrica (60 Hz) por medio de filtro pasa banda entre 1 y 50 Hz.

4. Calculo de la transformada de Hilbert.

Figura 4.8. Señal chirp y frecuencia instantánea. -a- la señal chirp originalmente muestreada a 100 Hz (figura 4.7), ahora remuestreada a 1000 Hz, con incremento lineal de 0 a 40 Hz en 2 s; -b- frecuencia instantánea a partir de ec. 4.19 con señal remuestreada y -c- frecuencia instantánea calculada con ec. 4.21.

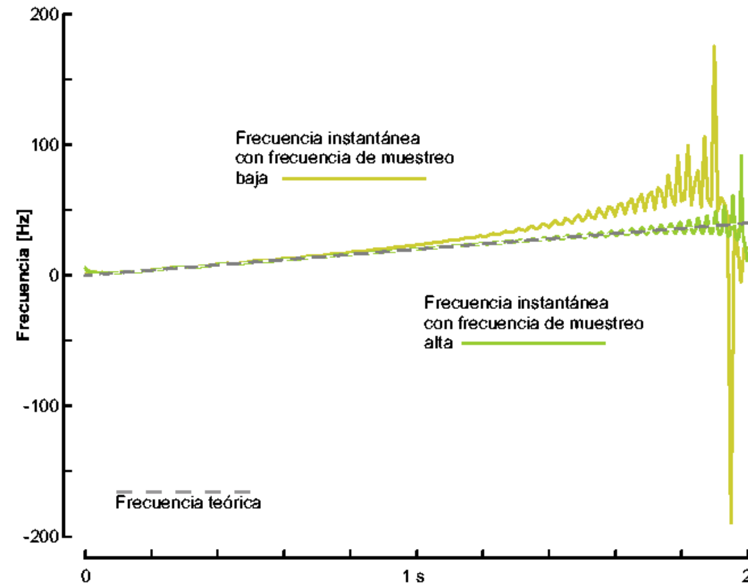


5. Calculo de parámetros a partir de datos resultantes del punto anterior y aplicando las ecuaciones 4.19 y 4.23 (tabla 4.1).

Para observar el comportamiento de la frecuencia y ancho de banda instantáneos utilizando la ecuación 4.19 y 4.23 se realizaron pruebas con diferentes tipos de señales. La primera de ellas corresponde a una señal armónica –seno– monofrecuencia en 0.5 Hz (Fig. A.7, pág 95) con la cual la frecuencia y ancho de banda instantáneos se encuentran concentrados alrededor de la frecuencia teórica. Sin embargo, en los extremos de la señal (t = 0 y t = 10) la frecuencia y ancho de banda instantáneos crece, esto se debe a la discontinuidad de la señal en esos puntos y puede ser interpretado como impulso (con un valor muy pequeño) en la señal.

Adicionalmente se generó la señal multifrecuencia de la forma $y(t) = A_1\text{sen}(2\pi f_1 t) + A_2\text{sen}(2\pi f_2 t)$ (Fig. A.8), con frecuencias f_1 y f_2 de 0.5 y 1 Hz, y ponderadación A_1 y A_2 de 1.0; se puede observar en esta figura que la frecuencia instantánea máxima esta al rededor de 0.75 Hz, es decir, es el promedio de ambas frecuencia. También, en algunos lugares de la señal la frecuencia se hace negativa y el ancho de banda instantáneo crece considerablemente, este proceso es periódico (cada t = 1) esto se debe a que la relación entre la amplitud de los dos armónicos es muy pequeña y el método no es capaz de resolver la frecuencia.

Figura 4.9. Frecuencias instantáneas usando método de Claerbout (1992) para dos señales con frecuencia de muestreo de 100 y 1000 Hz. La frecuencia instantánea mas desviada respecto a la teórica es de la muestreada a 100 Hz, la frecuencia instantánea que oscila respecto a la teórica es muestreada a 1000 Hz.

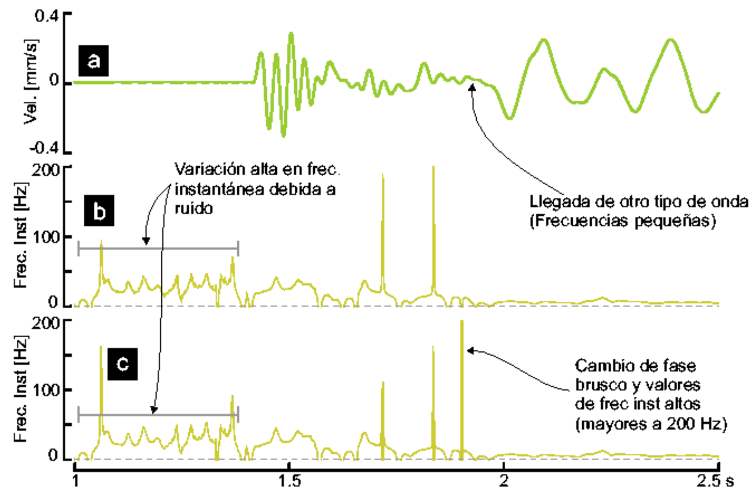


Por último se graficaron las tres componentes de una voladura registrada el 7 de abril de 2000 y sus respectivas frecuencias y anchos de banda instantáneos (Figura A.9, pág 96), se puede observar que antes de la llegada de las primeras ondas (P) la frecuencia instantánea y ancho de banda instantáneo no tienen un patron definido. Adicionalmente se hizo un acercamiento donde se encuentran los valores máximos de la señal (velocidad), este acercamiento esta entre 1 y 2.5 en tiempo y entre 0 y 25 Hz en frecuencias (Figura A.10, pág. 97), allí se puede observar la estabilidad del método cuando se calcula la frecuencia y ancho de banda instantáneos alrededor del máximo de la señal.

4.5.5. Limitaciones del análisis de la señal compleja

Todos los métodos de procesamiento de señales tiene limitaciones y el análisis de señal compleja no esta excento de ellas. Existen diversas opiniones sobre la interpretación de la frecuencia instantánea y el ancho de banda instantáneo –atributos instantáneos de la señal–, las cuales van desde su no existencia hasta ser aceptadas únicamente para el caso de señales con una sola frecuencia en cada instante de tiempo o monocomponente (Huang et al., 1998; Boashash et al., 1991). Las dificultades más importantes que limitan la aceptación del concepto como frecuencia y ancho de banda instantáneos son:

Figura 4.10. Señal de voladura y frecuencias instantaneas. -a- Señal de voladura (fecha 2000/06/20) muestreada a 200 Hz y remuestreada a 1000 Hz, -b- frecuencia instantánea calculada con ecuación 4.19, -c- frecuencia instantánea calculada con la ecuación 4.21



1. Esta influenciado por el análisis espectral de Fourier, pues para hallar la señal analítica la Transformada de Hilbert se recurre a la transformada de Fourier.

2. El concepto de frecuencia instantánea asume que la señal contiene una sola frecuencia. Si existe mas de una, entonces la frecuencia instantánea arroja un valor que no esta relacionado con ninguna frecuencia, sino con el promedio ponderado (en amplitud de cada onda) de cada una de las frecuencias (Loughlin y Tacer, 1997).

3. La derivada de la fase (ec. 4.9), independientemente del método numérico utilizado para calcularla, puede arrojar frecuencias negativas, lo cual no es fácil de interpretar ya que se supone que no hay energía en el espectro de la señal analítica para tales frecuencias cuando se realiza la transformada de Hilbert (Steeghs, 1997).

4. Para que la frecuencia instantánea tenga sentido es necesario que la señal sea de banda angosta (Huang et al., 1998). Esta fue otra de las razones por la cual se utiliza incremento de la frecuencia de muestreo por interpolación.

4.6. Secuencia de procesamiento

Para el análisis de los datos se utilizó *MATLAB*©, que es un lenguaje de alto nivel orientado a operaciones con matrices, con una amplia gama de librerías –*toolbox*– en diferentes áreas y altas prestaciones gráficas. De las librerías la mas usada en este proyecto fue la de procesamiento de señales (*Signal Processing Toolbox*).

Adicionalmente al procesamiento planteado en la sección anterior (sección 4.5 – Análisis de señal compleja) se realizó el cálculo de la transformada de Fourier y calculo de frecuencia por el método de la bisección, este último es utilizado en la instrumentación de vibraciones para voladuras (Dowding, 2001, página 142).

La transformada de Fourier se calculo ventaneada como se presenta en el manual *Signal Processing Toolbox User's Guide* de MathWorks (2000), página 3-11; El método de la bisección se aplicó como lo muestra en Chapra y Canale (1999), página 131.

Los tipos de análisis descritos anteriormente son recomendados por las normas o están implementados, en el caso de la bisección, en sismográfos de campo. La frecuencia escogida por análisis de Fourier corresponde a la más baja, o frecuencia dominante, asociada con el máximo de la señal (Dowding, 2001, página 151). Por otro lado el método de la bisectriz arroja solo un valor de frecuencia dentro del intervalo que se encuentra la máxima velocidad.

El procesamiento utilizado en la elaboración de este proyecto se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Conversión de formato de *Geosys* $\rightarrow$ *MATLAB*$^{\copyright}$ (digitalizado a 100 Hz).
2. Corrección de linea base.
3. Filtrado de la señal en la banda 0 a 50 Hz, con el fin de eliminar el ruido causado por inducción eléctrica (a 60 Hz).
4. Remuestreo de la señal a 1000 Hz.
5. Calculo de la resultante vectorial (ecuación 4.1) y resultante vectorial horizontal (ecuación 4.2).
6. Búsqueda del valores máximos: velocidad pico por componente, máximo de la resultante vectorial y horizontal.
7. Cálculo y búsqueda de la frecuencia asociada al máximo valor de velocidad por componente por medio del método de la bisectriz.
8. Cálculo de la transformada de Hilbert, de la frecuencia y ancho de banda instantáneo de la señal, y lectura de estos valores en el máximo de la señal.
9. Cálculo del espectro de Fourier por componente y búsqueda del la frecuencia minima asociada con el valor de máxima velocidad por componente.

En general, el procedimiento anterior (excluyendo algunos puntos específicos utilizados en relaciones de tiempo-frecuencia y en el tipo de programa utilizado para el análisis) es el

utilizado para la comparación de las mediciones con valores representativos de las normas internacionales en control de vibraciones por actividad humana.

El procedimiento mostrado fue aplicado a las 504 señales de voladuras grabadas en las estaciones sismológicas instaladas en Mulaló y San Marcos entre 1999 y 2002 y los resultados se encuentran en el Anexo F, tabla F.1 (página 159).

5. NIVELES Y EFECTOS DE LAS VIBRACIONES

5.1. Introducción

Para evaluar los posibles efectos de las vibraciones producidas por voladuras sobre las estructuras se suele recurrir a normas, las cuales están basadas en cientos de observaciones de daños causados a estructuras con diferentes características como respuesta a este tipo de solicitaciones. En esta sección se compararan los valores calculados en la sección 3.4 (pág. 32) con los datos procesados de vibraciones.

La frecuencia de la vibración es una parámetro importante y a la vez polémico incluido en algunas normas para la evaluación de los efectos de las vibraciones. Como parte del trabajo se comparan los diferentes métodos utilizados para calcular las frecuencias –Fourier, cruce por ceros y frecuencia instantánea–, y se muestra que las técnicas de frecuencia instantánea y cruce por ceros son similares, mientras que la frecuencia evaluada con el método de Fourier diverge respecto a estos dos.

En esta sección también se plantean las relaciones empíricas que son utilizadas en el fenómeno de las explosiones. Con la información disponible, es decir con los parámetros básicos de diseño de las voladuras (carga y distancia al sitio de medición) y los registros de vibraciones se plantea la ley de escalamiento cubico para el caso particular de las voladuras realizadas en la mina La Calera; ley que esta basada en relaciones adimensionales entre las diversas variables que entran en juego en una explosión. Adicionalmente se describirán las causas de dispersión en los datos con los que se planteo la ley de escalamiento.

Por ultimo, con base en las relaciones empíricas descritas y con las base en las referencias disponibles, se plantean posibles vias para la reducción los niveles de vibración.

5.2. Información disponible

La información utilizada para elaborar este proyecto corresponde a datos de las voladuras realizadas por Cementos del Valle en la mina La Calera en el periodo de mayo 1999 a agosto 2002. Parte de esta información corresponde a datos obtenidos en campo mediante instrumentación (registros de las vibraciones causados por las voladuras) y la otra parte de la información fue proporcionada por Cementos del Valle y corresponde a los parámetros involucrados en el diseño de cada una de las voladuras.

Las estaciones dedicadas al monitoreo de las vibraciones producidas por voladuras de la mina La Calera han funcionado con diferentes intervalos de continuidad en las poblaciones de San Marcos y Mulaló (ver sección 2.5.2, página 14). Adicionalmente, no todas las voladuras

reportadas por Cementos del Valle fueron registradas, esto debido a que no superaron el umbral de detección (voladuras pequeñas y/o lejanas) o a que la memoria de los sistemas de adquisición se llenó.

5.2.1. Eventos Registrados

La base de datos de registros tiene en total 4576 eventos, estos fueron catalogados a partir de la forma de la señal así: 3962 (86 %) fueron catalogados como ruido ambiental, es decir, producidos por tráfico vehicular, actividad agraria y/o humana y condiciones medio ambientales como vientos o lluvias; 504 (11 %) correspondieron a voladuras y 110 (aprox. 3 %) se catalogaron como sismos[1]. En la Tabla 5.1 se muestran la distribución de los 505 registros de acuerdo a la estación y al sistema de adquisición que los registró.

Tabla 5.1. Distribución de registros de voladuras por ubicación y equipo de adquisición. Todos los eventos registrados

	Estación				
	San Marcos	Mulaló	Leo Sieber	Otro	Total
GSR18	93	—	289	—	382
GCR16	99	18	—	5	122
Total	192	18	289	5	504

5.2.2. Información de las voladuras de Cementos del Valle

Cementos del Valle proporcionó información básica de todas las voladuras (862) realizadas desde junio de 1999 hasta agosto de 2002. La información incluye: [1] Fecha de la voladura, [2] Código único de la voladura, [3] Sector donde se ejecutó la voladura, [4] Nivel –altura– de la voladura, [5] y [6] Posición de la voladura (coordenadas geográficas), [7] Cantidad de material removido (kilogramos) y [8] Carga de ANFO (kilogramos).

La correlación entre registros y voladuras se llevo a cabo usando los siguientes criterios: 1) se tuvieron en cuenta solo los datos correspondientes a los días en que Cementos del Valle reporta una sola voladura, ya que de esta manera es casi seguro que el registro obtenido en una o ambas estaciones (uno o dos archivos) correspondan a esa voladura; 2) se excluyeron voladuras reportadas con información incompleta – sin posición, carga de ANFO y material desplazado. En total cumplieron con estos requisitos 217 voladuras (260 registros), la información de estas voladuras se incluye en la Tabla E.1 (Anexos, página 150).

[1]Las formas de onda en los tres casos –ruido, sismos y voladuras– son diferentes, por tanto mediante inspección visual y con base en la experiencia es posible discriminar las señales.

La Tabla 5.2 muestra la distribución de los 260 registros de voladuras discriminando deacuerdo al equipo utilizado para su adquisición y su ubicación. La distribución espacial de las voladuras correspondientes se muestra en la Figura A.4 (Anexos, página 93).

Tabla 5.2. Distribución de registros de voladuras por ubicación y equipo de adquisición. Eventos relacionados con información de Cementos del Valle

	Estación			
	San Marcos	Mulaló	Leo Sieber	Total
GSR18	62	—	129	191
GCR16	61	8	—	69
Total	123	8	129	260

5.3. Comparación de frecuencias

En procesamiento de señales, y en especial con las señales transitorias, la frecuencia es un tema controversial. Existe una definición clara de frecuencia para señales armónicas, es el numero de veces que en la unidad de tiempo se repite el mismo valor de la perturbación; sin embargo existen varias formas de calcularla (p.e.: cruces por cero, transformada de Fourier, frecuencia instantánea) que en algunos casos –señales armónicas– tienen el mismo valor, pero en otros –señales transitorias– los valores calculados de las frecuencias pueden divergir.

Los métodos utilizados para calcular la frecuencia en este proyecto (ver sección 4.6, pág. 62) y comparados gráficamente en la Fig. 5.1 son:

Análisis de Fourier. De todas las frecuencias en el espectro de Fourier la que se escoge y utiliza de aquí es la *máxima dominante*, es decir la frecuencia con el mayor valor de amplitud en el espectro. Esta frecuencia esta asociada con la señal que aparece por mayor tiempo en el registro, y esta frecuencia es representativa de todo el registro. Esta frecuencia se le designa como frecuencia dominante.

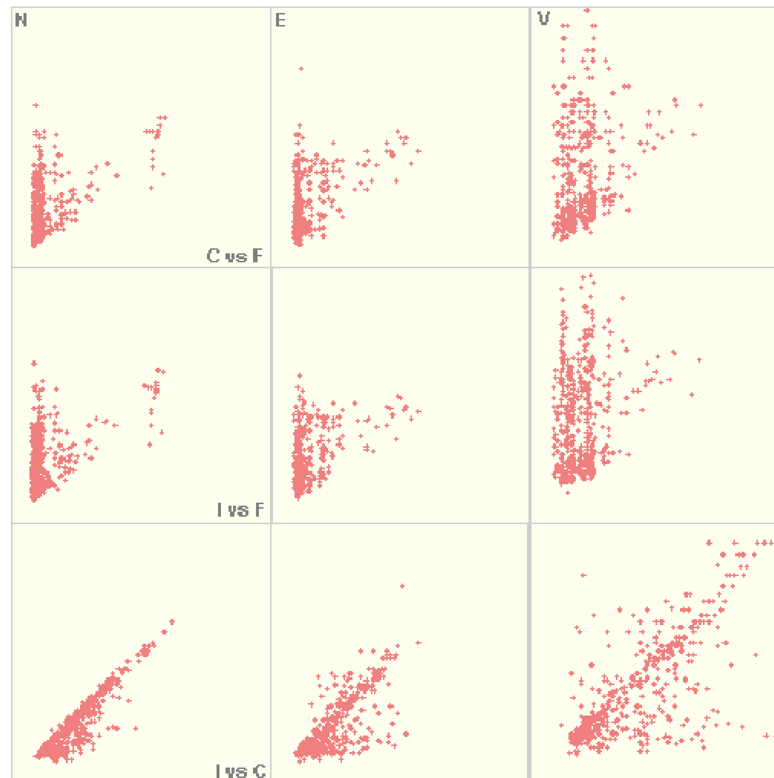
Cruces por cero. La frecuencia es calculada a partir de de dos cruces por cero consecutivos en la parte de la señal donde se encuentra la velocidad pico. Esta frecuencia es representativa de una ventana pequeña de la señal. A esta frecuencia se le designa como frecuencia asociada al [a la] máximo[a] [velocidad].

Frecuencia instantánea. Calculada a partir de la transformada de Hilbert, esta es representativa de una ventana muy pequeña de señal. A esta frecuencia también se le designa como frecuencia asociada al [a la] máximo[a] [velocidad].

De las anteriores descripciones se puede rescatar la idea de que los valores de frecuencias están asociados a una frecuencia dominante (análisis de Fourier) o a la frecuencia asociada a

la máxima velocidad (cruce por ceros y frecuencia instantánea). Sin embargo estos términos no siempre son usados explícitamente, sino que se recurre a utilizar el termino *frecuencia* y el método con el que se calcula (de Fourier, por cruces por cero, etc).

Figura 5.1. Comparación de las frecuencias de Fourier (F), cruce por ceros (C) y frecuencia instantánea (I) de las 504 voladuras en el periodo junio 1999 – agosto 2002, las columnas de izquierda a derecha son las componentes: norte, este y vertical; las filas de arriba hacia abajo son: C vs F, F vs I e I vs C. Todas las sub-gráficas están a la misma escala y va de 0 a 30 Hz en ambas direcciones.



Analizando la Figura 5.1 se puede observar que hay una correspondencia lineal y aproximadamente de 1:1 entre la frecuencia instantánea y los cruces por cero, es decir son valores casi homólogos, mientras que si se observa la relación entre estos dos y la frecuencia hallada con análisis de Fourier, se aprecian resultados dispares. En parte la diferencia de los resultados obtenidos con el análisis de Fourier se debe a que se están comparando escalas diferentes, para Fourier se utiliza toda la señal de la voladura (representativo de toda la señal), mientras que para el cruce por ceros (por medio de bisección) se utiliza una pequeña ventana y para la frecuencia instantánea se utilizan una ventana mucho mas pequeña que cruce por ceros (representativo de una pequeña parte de la señal).

En los tres casos se observa que las frecuencias en la componente vertical son superiores y presentan mayor dispersión que las componentes norte y este; esto se puede ser debido a que la componente vertical está mas influenciada por ondas de cuerpo como la *P*, mientras que las componentes norte y este estén influenciadas por ondas superficiales las cuales generalmente tienen frecuencias más bajas que la *P*.

También se puede observar que las sub-gráficas en las que está presente el análisis de Fourier (filas 1 y 2) hay concentración de valores de frecuencias alrededor de valores determinados, lo cual no ocurre con los otros dos análisis (cruce por ceros y frecuencia instantánea). Esto se debe a que el análisis de Fourier da más peso a los valores que aparecen en la mayor parte de la señal y que en este caso podrían deberse a condiciones particulares del terreno (efecto local) o a efectos de la fuente.

Las normas internacionales permiten usar las frecuencias halladas a partir de un análisis de Fourier o un análisis de cruces por cero, aunque como se ve en la primera fila de la Figura 5.1 no hay realmente una relación muy clara entre ellas. No obstante, si se permite usar cruces por cero, entonces podríamos justificar el uso de la frecuencia instantánea, dada la similitud de los resultados obtenidos con estas dos técnicas (Figura 5.1, tercera línea).

5.4. Conformidad con las normas internacionales

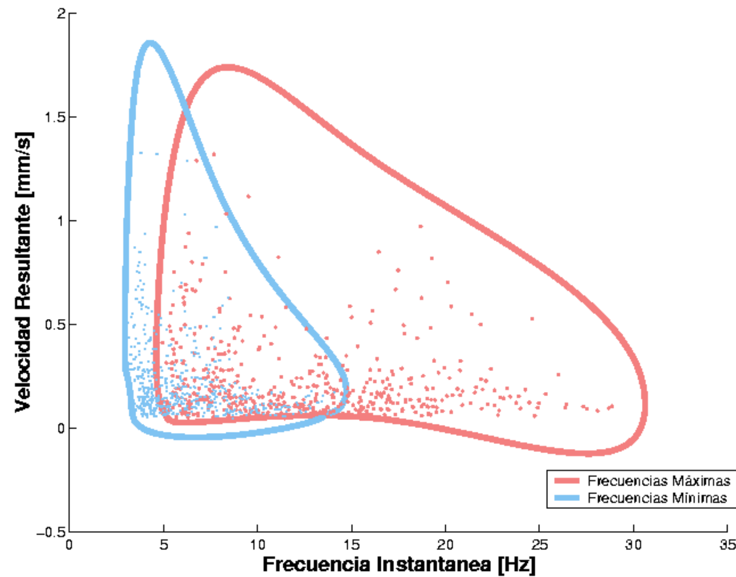
Como parte de los objetivos de este proyecto se planteó verificar que las vibraciones generadas en las voladuras de la mina La Calera hayan cumplido con las normas internacionales. Para cumplir este objetivo se comparan los valores impuestos por las normas para el caso particular (iglesia de Mulaló, en sección 3.4, pág. 32), con los valores de velocidad máxima (resultante o por componente) y la frecuencias (de Fourier, cruce por ceros e instantánea) asociadas.

Para efectuar la comparación se realizan representationes gráficas en las cuales las abscisas representan la frecuencia (de Fourier, cruce por ceros o instantánea) y las ordenadas los valores de velocidad, en esta gráfica se incluyen los valores máximos permitidos por las normas (p.e.: Figura 3.2, pág. 34) y los valores puntuales obtenidos de los registros de vibraciones causados por voladuras.

Los valores puntuales de velocidad y frecuencia se escogieron así: 1) el valor de velocidad depende de la norma, algunas utilizan la velocidad pico en la componente vertical, otras la resultante, sin embargo en este proyecto se utilizara indistintamente de la norma la velocidad resultante, por ser la más conservativa; 2) se suele escoger la frecuencia asociada a la velocidad como la mas pequeña de las tres (una por componente), escogerla de esta manera implica que los valores van a ser conservativos, ya que las velocidades máximas permitidas por las normas usadas en este trabajo son siempre menores hacia las frecuencias bajas. En la Figura 5.2 se pueden observar los valores (504 registros) de velocidad resultante máximos y su frecuencia instantánea asociada mínima –azul– y máxima –rojo–, se puede

observar que la franja azul se concentra hacia las frecuencias consideradas criticas por algunas normas (aprox. 4 Hz, ver Figura 3.2 en pág. 34).

Figura 5.2. Comparación entre las frecuencias instantáneas máximas y mínimas



Para garantizar la conformidad con las normas se estudiaron todos los registros disponibles en el catalogo (504), sin importar su posible correspondencia con la información suministrada por Cementos del Valle. Aunque este trabajo propone el uso de la frecuencia instantánea, la verificación de la conformidad con las normas se hizo utilizando las tres técnicas: análisis de Fourier (Fig. 5.4-a- , en el final de esta sección), frecuencia instantánea (Fig. 5.4-c-) y cruce por ceros (Fig. 5.4-b- bisección).

En general, de la Figura 5.3 se puede concluir que los 504 registros de vibraciones producidas por las voladuras en la mina La Calera—Cementos del Valle, cumplen con la normatividad internacional para el caso mas critico (Iglesia de Mulaló), ya que en ningún momento sobrepasaron los niveles máximos exigidos por ellas.

En la Figura 5.4-a- se evidencia la tendencia de las frecuencias obtenidas mediante Fourier a concentrarse alrededor de ciertos rangos (aprox. 3 Hz), mientras que las otras dos técnicas (Fig. 5.4-b- y 5.4-c-) tal tendencia no existe. Esta tendencia posiblemente se deba, como ya se explico, a un efecto local o de la fuente.

Por otra parte las Figuras 5.4-b- y 5.4-c- (cruce por ceros y frecuencia instantánea respectivamente) son relativamente parecidas, sin embargo frecuencia instantánea tiene menor dispersión respecto a cruce por ceros. Las frecuencias altas en estas gráficas –aproximadamente mayores a 8 Hz– posiblemente se deban a ondas de cuerpo o acústicas (P, S y P_{ac}), mientras las frecuencias bajas posiblemente estén asociadas a ondas superficiales R.

5.5. Relaciones entre vibraciones y parámetros de voladuras

Existen varios procedimientos empíricos y estadísticos de clasificación para relacionar las variables medidas en las voladuras (frecuencia, desplazamiento, velocidad y aceleración) y los parámetros de diseño de las voladuras (cantidad de explosivos, secuencia de retardos, etc.). En esta sección se utilizara las relaciones empíricas aplicables al caso concreto de vibraciones producidas por voladuras en la mina La Calera – Cementos del Valle.

Los procedimientos estadísticos de clasificación, que buscan encontrar relaciones y agrupaciones en datos multidimensionales (velocidad, carga, distancia, tipo de materiales, etc). Estos tipos de análisis de datos pueden ser gráfico y/o estadísticos. Los métodos estadísticos que pueden ser aplicados a este tipo de datos son los de estadística multivariada, entre los cuales encontramos: el análisis de cúmulos (*Cluster Analysis*), el análisis de componentes principales (*Principal Component Analysis*), análisis de correspondencia (*Correspondence Analysis*), entre otros. Sin embargo, dado los alcances de este proyecto estos métodos de clasificación estadística (y gráfica) no serán utilizados.

5.5.1. Relaciones empíricas

Las relaciones empíricas están enfocadas en la predicción de valores de vibraciones –desplazamiento, velocidad, aceleración de partícula y frecuencia asociada a la vibración máxima– producidos por explosiones con el fin de ser utilizados para conocer y controlar los efectos sobre construcciones civiles y equipos delicados.

Teniendo en cuenta las variables significativas en el fenómeno de una explosión y por medio de un análisis dimensional, aplicando el teorema Π de Buckingham[2] se obtienen tales relaciones empíricas. En la Tabla 5.3 se incluyen las variables que se ha visto explican el fenómeno de una explosión en un medio homogéneo e isotrópico, en ella se muestran las variables independientes, relacionadas con la fuente de las vibraciones (p.ej.: cantidad de explosivo utilizado), y las dependientes, relacionadas con las vibraciones. En total se tienen nueve variables que explican el fenómeno y éstas están formadas únicamente por tres dimensiones (F, Fuerza; T, tiempo y L, longitud), por lo tanto existen seis términos adimensionales que describen una explosion.

[2]En general define que si un fenómeno tiene N variables y M dimensiones (Tabla 5.3 para las explosiones) entonces hay $N - M$ términos adimensionales que relacionan dichas variables.

Tabla 5.3. Variables consideradas en el análisis adimensional del fenómeno de explosiones

Variable	Símbolo	Dimensión†
Independiente		
Energía liberada en la explosión‡	W	FL
Distancia desde la fuente hasta sensor	R	L
Velocidad de las ondas en el suelo/roca	c	LT^{-1}
Densidad de la roca y el suelo	ρ	FT^2L^{-4}
Tiempo	t	T
Dependiente		
Desplazamiento máximo del suelo	u	L
Velocidad máxima del suelo	$\dot{u}$	LT^{-1}
Aceleración máxima del suelo	$\ddot{u}$	LT^{-2}
Frecuencia asociada a la máxima vibración	f	T^{-1}

Tomado de Dowding (2001).
† F, fuerza; L, longitud; T, tiempo.
‡ Se utiliza el peso del explosivo (W) ya que es proporcional a la energía.

En Dowding (2001), existen seis parámetros o términos adimensionales –proporcionales entre sí– que relacionan las variables de la Tabla 5.3, estos son: u/R, $\dot{u}/c$, $\ddot{u}R/c$, ft, tc/R, $W/\rho c^2 R^3$, . Los cuatro primeros términos enlazan las variables dependientes e independientes mientras que los dos últimos solo combinan variables independientes. Los seis términos adimensionales son proporcionales entre sí.

De los seis términos adimensionales los más utilizados son aquel que relaciona la velocidad máxima de partícula y la velocidad de propagación de la onda, $\dot{u}/c$ y el que relaciona la distancia y la energía de la voladura, $W/\rho c^2 R^3$, de la proporcionalidad entre estos términos tenemos

$$\frac{\dot{u}}{c} \propto \frac{W}{\rho c^2 R^3}.$$

La anterior ecuación puede ser convertida en una igualdad si se añade una constante de proporcionalidad M; adicionalmente, eliminando un termino de velocidad en ambos lados de la ecuación, se obtiene

$$\dot{u} = M\left(\frac{1}{\rho c}\frac{W}{R^3}\right),$$

que es una ecuación dimensional respecto a la velocidad, en ella ρc es la impedancia del medio, que en un medio (p.ej.: suelo) es una medida de la resistencia de la partícula a moverse. Específicamente en elasticidad es la relación entre el esfuerzo y la velocidad de partícula (Aki y Richards, 1980).

Si las vibraciones viajan por un solo medio y este se supone homogéneo e isotrópico, entonces, el termino de impedancia ρc es constante, y por lo tanto $M/(\rho c)$ puede ser reemplazado por una constante cualquiera, por ejemplo K. Sin embargo K no es del todo

constante, puede tener variaciones ya que la suposición, medio homogéneo e isotrópico, no siempre se cumple. Cabe notar que el termino de impedancia (ρc) es susceptible a cambios en el tipo de onda (Aki y Richards, 1980). El término W/R^3 es transformado a $R/\sqrt[3]{W}$ para tener una relación directa entre las vibraciones y la distancia, obteniéndose

$$\dot{u} = K\left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}}\right)^{\alpha}, \tag{5.1}$$

La ecuación 5.1 es llamada ley de escalamiento cubico y la razón $R/\sqrt[3]{W}$ es llamada distancia escalada cubica[3]. En esta ecuación R es la distancia desde la voladura hasta el sitio de interés (sitio de medición) y W es la carga que genera las vibraciones. A partir de esta ecuación se pueden predecir, con cierta confianza, los valores de velocidad máxima de partícula como función de la carga (W) y la distancia (R).

Los valores K y α son constantes que deben ser estimadas. Ambas constantes dependen directa o indirectamente de las condiciones geológicas de la región. El valor K depende directamente de las condiciones geológicas ya que esta relacionado con la impedancia; El valor α teóricamente tiene un valor de -3, sin embargo puede tener variaciones que dependen de la eficiencia sísmica de la carga (porcentaje de la energía que es convertida en ondas sísmicas) y de cambios en la distancia –R– debido a diferencias en los caminos de las ondas por condiciones geológicas y geotérmicas locales y regionales.

Para calcular las constantes K y α, la velocidad resultante, $\dot{u}$, y la distancia escalada $R/\sqrt[3]{W}$ se transforman a escala logarítmica de la siguiente manera:

$$\log_{10}(\dot{u}) = \alpha \log_{10}\left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}}\right) + \log_{10}(K),$$

con información de $\dot{u}$ de los registros y $R/\sqrt[3]{3}$ de diseño y por medio de mínimos cuadrados (Norma L_2), se encuentra la mejor recta que se ajuste a los datos, y tendremos que $\log(K)$ es el intercepto con $\log\left(R/\sqrt[3]{W}\right)$ y α es la pendiente de la recta.

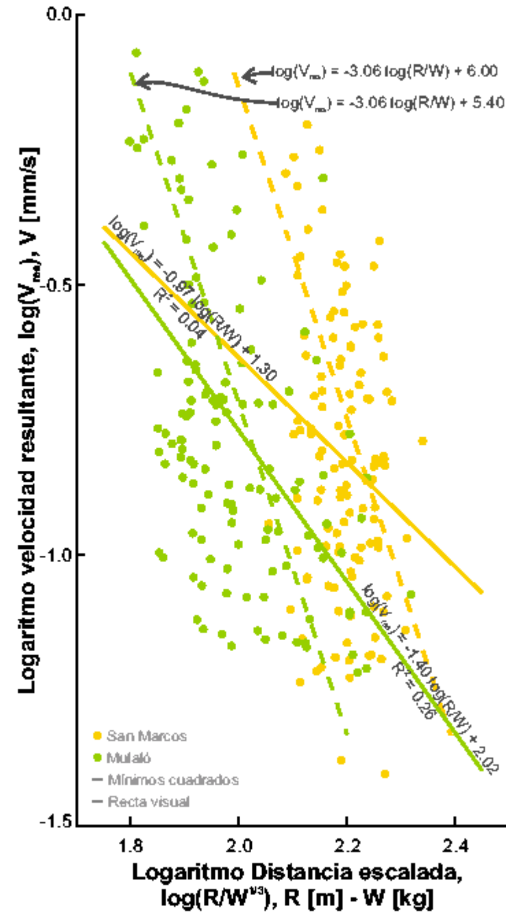
La ecuación 5.1 es utilizada en el control y manejo de vibraciones producidas por voladuras, sin embargo existen otras relaciones empíricas basadas en los términos adimensionales descritos (ver por ejemplo Sebos, 1999), las cuales no se han estudiado a fondo, y por lo tanto no se incluyen en este trabajo.

5.5.2. Aplicación de la ley de escalamiento cubico a los datos de la mina La Calera – Cementos del Valle

[3] Para diferenciarlo del escalamiento cuadrático, $R/\sqrt[2]{W}$, que ha sido encontrado experimentalmente y que es apropiado para describir el fenómeno cuando la carga es tiene una forma cilíndrica.

Para aplicar la ley de escalamiento cubico se utiliza la información de diseño de la voladura y los registros de vibración asociados a estas. Cementos del Valle suministró información de la carga total utilizada en la voladura (W_{total}) y la posición de la voladura, con este ultimo dato y la posición de la estación se puede calcular la distancia R.

Figura 5.4. Ley de escalamiento cubico para los datos de la mina La Calera.



Como las constantes K y α varían con las condiciones geológicas, y como las estaciones han estado sobre dos depósitos de vertiente independientes (Q. San Marcos y Q. Mulaló), se realizó el análisis para cada caso por separado. El número de registros de vibraciones cotejados con la información de Cementos del Valle de voladuras es de 129 para la estación Mulaló y de 123 en la estación San Marcos. De estos registros se obtuvo la velocidad máxima de partícula.

Para estimar las constantes K y α se utilizó el método tradicional (descrito al final de la sección 5.5.1), que consiste en una estimación por mínimos cuadrados de dichas constantes a partir de los datos de velocidad de partícula máxima ($\dot{u}$) y distancia escalada ($R/\sqrt[3]{W}$). El resultado de la regresión se muestra en la Figura 5.4 en líneas continuas, donde el color verde corresponde a datos de Mulaló y amarillo a San Marcos, los datos de vibraciones son círculos del mismo color. La ecuación lineal de escalamiento cúbico (linea recta en escala log-log) para la estación Sieber en Mulaló es

$$\log(\dot{u}) = -1{,}40 \log\left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}}\right) + 2{,}02.$$

De la anterior ecuación se obtiene que el valor α es aproximadamente -1.40 y K es aproximadamente 104 (unidades??). El R^2 de la estimación por mínimos cuadrados es de 0.26; es

decir, esta linea recta no explica muy bien los datos[4]. La anterior ecuación puede ser expresada como la ecuación 5.1 con los valores de α y K mostrados anteriormente, obteniéndose

$$V_{\text{res}} = 104 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1,40} \tag{5.2}$$

Para la estación en San Marcos se realizo también la estimación por mínimos cuadrados de la recta de escalamiento cubico (linea amarilla continua en la Fig. 5.4), fue necesario dejar por fuera el 5 % (6) de los datos debido a su dispersión (*outlayers*), la recta resultante es

$$\log(\dot{u}) = -0{,}97 \log \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right) + 1{,}30,$$

de esta ecuación se obtiene un valor α de aproximadamente -0.97 y K aproximadamente 20 (unidades??). El valor R^2 de estimación de esta recta es muy bajo, 0.04, lo que indica que no hay una correspondencia entre los datos y la recta estimada. La anterior ecuación puede ser expresada en términos de la ecuación 5.1 y con los valores α y K estimados por mínimos cuadrados, con lo cual se obtiene

$$\dot{u} = 20 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-0,97} \tag{5.3}$$

Debido a la baja correlación entre las rectas estimadas por mínimos cuadrados y los datos (R^2 0.26 en Mulaló y 0.04 en San Marcos) y a la aparente tendencia que tales datos muestran en la Figura 5.4, se trazaron dos rectas (líneas discontinuas) una para Mulaló (en verde) y otra para San Marcos (amarillo). La pendiente de las dos rectas se escogió visualmente sobre los datos de la estación con mayor velocidad resultante, es decir la estación Mulaló, se supuso pendientes iguales ya que las variaciones en distancia y energía liberada en las voladuras no deben variar en ordenes de magnitud. Los datos en la estación Mulaló presentan una tendencia mas o menos clara, la pendiente (α) con estos datos es aproximadamente de 3.04, valor que es compatible con lo expuesto en la sección anterior. El valor $\log(K)$ también se escogió visualmente y tratando que este sea representativo de los datos.

Las ecuación de que muestran la tendencia (visual) de los datos para Mulaló puede ser

$$\dot{u} = 251190 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-3,06}, \tag{5.4}$$

y para San Marcos la ecuación puede ser

$$\dot{u} = 1000000 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-3,06} \tag{5.5}$$

[4]El valor R^2 indica que tan bien o mal la recta estimada se ajusta a los datos, si este valor es cercano a cero la recta no describe bien los datos y si es cercano a uno la recta los describe bien aunque esto no implica que el modelo sea el adecuado.

El cambio en el valor de K en las dos ultimas ecuaciones (5.4 y 5.5), tendencia que también se aprecia en la Figura 5.4 puede tener dos explicaciones: 1) como K depende de una constante de proporcionalidad M (supuestamente iguales en las dos ecuaciones) y de la inversa de la impedancia del medio, $1/\rho c$, una posibilidad es que la impedancia en Mulaló sea mayor que en San Marcos, esto implicaría mayores velocidades de onda o densidad en el sitio de medición en Mulaló; 2) que la diferencia entre la energía liberada y el peso total explosivos (cambios en diseño de voladuras) halla cambiado en el periodo que funciono la estación Sieber (Mulaló) respecto a los datos de San Marcos. En la siguiente sección se discutirán otras posibles explicaciones a esta observación.

5.5.3. Dispersión en la distancia escalada

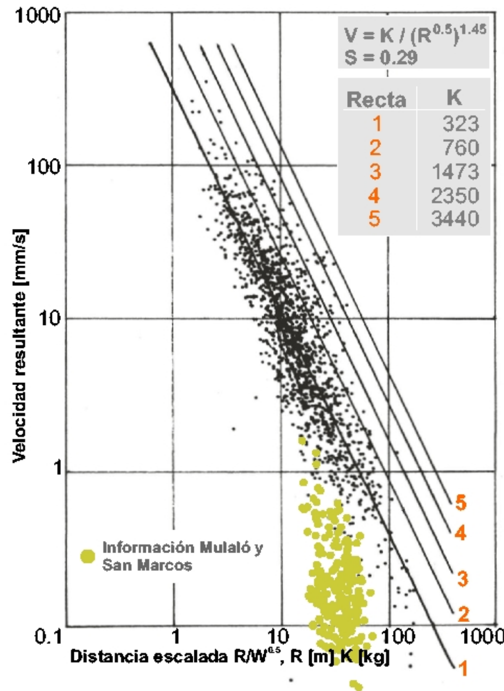
Cuando se gráfica la velocidad máxima resultante ($\dot{u}$) contra la distancia escalada cubica ($K(R/\sqrt[3]{W})^{\alpha}$, Figura 5.4) o cuadrática ($K_{\beta}(R/\sqrt[2]{W})^{\beta}$), en escala normal o logarítmica, se puede ver que existe dispersión entre la recta estimada (mínimos cuadrados o visual) y los datos. Esta dispersión puede deberse a varios factores como:

- **Factores asociados con el medio**
- las condiciones geológicas (presencia de fallas locales) y geotécnicas ,
- las fluctuaciones del nivel freático,
- **Factores asociados con la voladura**
- la geometría de los barrenos y su orientación
- las condiciones de confinamiento de la carga (Rendimiento de los explosivos)
- el tipo de explosivo utilizado,
- los tiempos de retardo entre cargas,
- **Otros factores**
- cobertura de los datos,
- diferentes tipos de onda en los cuales esta presente el máximo resultante, como las de cuerpo (*P* y *S*) y las de superficie (*R* y *L*),
- errores en las mediciones o durante el análisis de la información, (Persson et al., 1994).

Los dos factores que podrían ser más importantes en la dispersión de los datos en la Figura 5.4 son:

1. La correlación entre la carga total (W_{total}) con la velocidad resultante máxima ($\dot{u}$),
2. resolución de la información.

Figura 5.5. Comparación de las relaciones de atenuación de la USMB (Persson et al., 1994, pág. 362) y los datos de las voladuras registradas en San Marcos y Mulaló



En cuanto al primer factor, la correlación entre la carga total y la velocidad resultante máxima no es correcta ya que no se detona todo el explosivo instantáneamente en un solo punto, sino que se recurre a distribuir el explosivo en una cantidad de barrenos que son detonados en intervalos de tiempo regulares. El procedimiento adecuado es correlacionar la velocidad resultante máxima con la máxima cantidad de explosivos detonado por retardo[5]. Sin embargo, la información detallada de la disposición y secuenciación de barrenos no fue suministrada por Cementos del Valle.

El segundo factor –resolución de la información–, se presenta en la Figura 5.5, en esta se gráfico la información de este trabajo (puntos amarillos, en la forma cuadrática) y las relaciones de atenuación para voladuras realizadas por la USBM (*U.S. Bureau of Mines*). El punto importante es que la información de distancia escalada cuadrática de los datos de la mina La Calera están concentrados solamente en un orden de magnitud debido a que las distancias y cargas no varían mucho, con lo cual la observación del fenómeno no es adecuada.

5.6. Reducción de niveles de vibraciones en el suelo causados por las voladuras

5.6.1. A partir de las relaciones empíricas

Las relaciones de equivalencia mostradas en la sección 5.5.1, y de nuevo incluidas aquí (ecuación 5.6) establecen una relación entre la causa y el efecto en las voladuras. Los efectos –vibraciones

[5]También se suele utilizar la máxima cantidad de explosivos detonados en ventanas de 8 ms (USACE, 1989).

y frecuencias asociadas– que aparece en la parte izquierda de la ecuación 5.6, pueden ser reducidos modificando una o mas de las variables asociadas con la causa (W o R) en la parte derecha de la misma ecuación.

$$\left(\frac{u}{R} \propto \frac{\dot{u}}{c} \propto \frac{\ddot{u}R}{c} \propto ft\right) \propto \left(\frac{tc}{R} \propto \frac{W}{\rho c^2 R^3}\right) \tag{5.6}$$

Estas relaciones (5.6) se cumplen para cualquier tipo de carga (concentrada o cilíndrica) y distancia. Sin embargo, si se construyen ecuaciones de predicción con estas relaciones (p.ej.: la ley de escalamiento cubico) solo serían validas para cargas concentradas o a una distancias suficientemente grande de la voladura coma para ser considerada concentrada.

En la ecuación 5.6, las vibraciones (desplazamiento, velocidad y aceleración) estan relacionadas con la fuente y trayectoria (W y R) de la siguiente forma:

$$\left(\frac{u}{R} \propto \frac{\dot{u}}{c} \propto \frac{\ddot{u}R}{c}\right) \propto \left(\frac{W}{\rho c^2 R^3}\right).$$

En esta ecuación, si mantenemos la distancia R constante y variamos la carga W, el desplazamiento, la velocidad y la aceleración resultante (u, $\dot{u}$ y $\ddot{u}$ respectivamente) varían proporcionalmente, es decir una reducción en la carga implica una reducción con la misma proporción en las vibraciones. Por otro lado, si mantenemos la carga W constante y variamos la distancia R, la variaciones entre las vibraciones no son proporcionales, es decir si variamos la distancia, por ejemplo alejándonos, se espera que las aceleraciones varíen menos que la velocidad y aun menos que la aceleración.

Para regular los niveles de las vibraciones se puede controlar la distancia (R) o la carga (W). Sin embargo, la distancia es un parámetro que no se varia, ya que esta determinado por la ubicación de la obra civil o mina, entonces el único parámetro que fácilmente se puede cambiar es el tamaño de la carga.

La frecuencias asociadas a las vibraciones están relacionadas en la ecuación 5.6 en el cuarto y el quinto termino, entonces tenemos que

$$(ft) \propto \left(\frac{tc}{R}\right),$$

esto indica que para aumentar el valor de la frecuencia f (situación que es favorecida en la normatividad internacional aumentando los niveles de velocidad admisibles) hay que disminuir la distancia desde la fuente hasta el sitio de interés (R), aumentando a la vez los niveles de vibración –situación no deseable.

5.6.2. Recomendaciones generales para la reducción de vibraciones

Existe una gran cantidad de recomendaciones para la reducción de los niveles de vibraciones producidos por voladuras; sin embargo, se incluirán unas pocas encontradas en Dowding (2001); Persson et al. (1994); USACE (1989); OCE (1972) que el autor considera adecuadas para este proyecto.

En general, la reducción de los niveles de vibración se realiza adaptando, o ajustando los métodos, patrones de barrenos, esquemas de carga y de ignición, y teniendo en cuenta que las vibraciones dependen de

- la cooperación entre cargas, es decir la adición constructiva y destructiva de las ondas producidas por las cargas,
- las condiciones de confinamiento,
- las características de la roca,
- la distancia desde el sitio de la voladura hasta el sitio de interés,
- las características geológicas y geotécnicas.

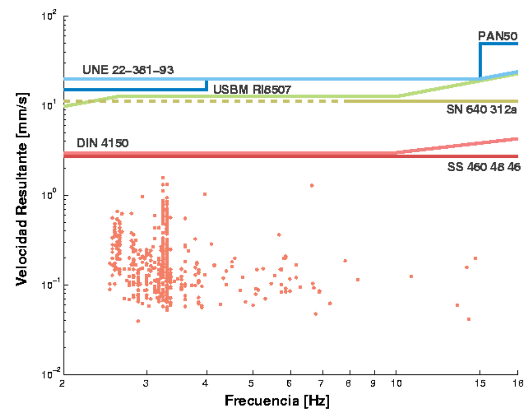
Los métodos comúnmente usados para reducir la vibraciones se basan en la reducción la cantidad de explosivo por unidad de tiempo y en la adición destructiva de las ondas (cooperación entre cargas), esto se logra por medio de

- la adaptación de los patrones de ignición con el fin de que las cargas estén repartidas en un intervalo mayor de tiempo,
- la reducción del número de barrenos y su diámetro,
- el uso de secuencias en cada barreno, con lo cual se divide la carga en mas intervalos de ignición,
- el desacople de las cargas, esto es utilizar diámetros menores de explosivos que el diámetro del barreno (no aplicable a lechadas explosivas).
- la división de un banco grande en varios pequeños.

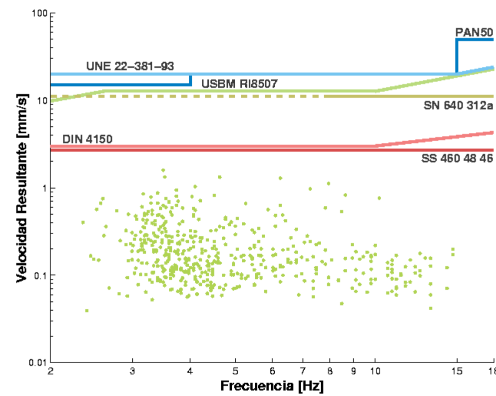
Otra recomendación encontrada es que en el momento de la detonación debería haber el menor confinamiento posible, esto se logra por medio del

- incremento de la inclinación del barreno,
- disminuyendo la distancia entre la cara libre y el barreno mas cercano.

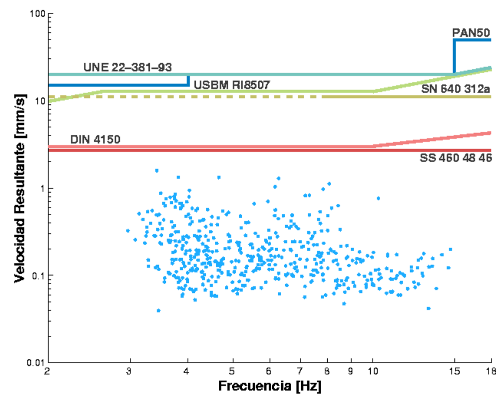
Figura 5.3. Conformidad con las normas



-a- Fourier



-b- Bisección



-c- Frecuencia instantánea

6. CONCLUSIONES

- A partir de la revisión bibliográfica, pudo concluirse que el uso de la normatividad internacional (basadas en muchas observaciones), es el estándar de trabajo para la evaluación de los efectos de las vibraciones causadas por actividad humana sobre las estructuras.

- Se observó además que las normas internacionales de manejo de vibraciones han venido desarrollándose lentamente: en un principio las normas únicamente tenían en cuenta la velocidad (vertical o resultante), después se incluyó la frecuencia de las solicitaciones. Se pudo observar que la tendencia es incluir la duración de las vibraciones en el análisis, concepto aún no implementado en las normas pero conceptualizado por la *ISO*.

- En general, el uso de las computadoras ha cambiado y revolucionado todas las áreas donde se trabaja con datos, esto también ha sucedido en el campo de las vibraciones. Los métodos anteriormente utilizados para la determinación de las frecuencias y velocidades de partícula, los cuales estaban basados en la aplicación de reglas empíricas por tanteo en la información, han sido reemplazados por métodos mas sofisticados y precisos. Sin embargo, estos nuevos métodos, y en especial el análisis de Fourier, han sido utilizados sin tener en cuenta sus limitaciones, lo cual es posible que haya llevado a interpretaciones erróneas.

- Para la aplicación de algunas normas es necesario calcular o estimar la frecuencia asociada a la velocidad máxima (por componente o resultante), la cual se puede obtener mediante el análisis de Fourier, cruces por ceros o espectro de respuesta, aunque con estos tres métodos se obtienen resultados diferentes. Como la mayoría de las normas establecen valores máximos aceptables para frecuencias asociadas al máximo de vibración, se decidió usar un método más objetivo para este fin, para lo cual se utilizó la frecuencia instantánea, que está basada en las relaciones de tiempo–frecuencia.

- Durante las mediciones se obtuvieron 504 registros de vibraciones producidas por voladuras de la mina La Calera, en tres estaciones de monitoreo ubicadas en las poblaciones de Mulaló y San Marcos. Todos los registros fueron utilizados para evaluar la relación entre frecuencia instantánea, cruces por cero y análisis de Fourier.

- Se analizaron tres métodos para el calculo de la frecuencias: 1) cruce por ceros (implementado con el método de la bisección), 2) análisis de Fourier y 3) frecuencia instantánea. Se observó que cruce por ceros y frecuencia instantánea arrojan resultados similares entre ellos, mientras que el análisis de Fourier arroja resultados diferentes

a lo obtenido para frecuencia instantánea y cruces por cero.

- Para el caso específico de la iglesia de Mulaló (la edificación más antigua y susceptible de la región) se verificaron las normas internacionales de control de vibraciones. Para esto se encontraron o calcularon los valores representativos de velocidad y frecuencia máximas admitidas por las normas, teniendo en cuenta las condiciones más parecidas (tipo de edificación, suelo, etc.) o las más desfavorables de la norma. Los valores de velocidad resultante máxima y frecuencia asociada de los registros fueron comparados con los de las normas, encontrándose que ninguna voladura registrada superó los valores representativos; es decir, para este caso concreto los datos demuestran que Cementos del Valle cumplió las recomendaciones de las normas.

- Se describieron las relaciones empíricas (estado de la técnica) desarrolladas para explosiones y aplicadas a vibraciones producidas por voladuras. De estas, se utilizó la que relaciona la velocidad resultante con los parámetros de diseño de las voladuras (carga W y distancia R) por que es la que esta relacionada con el impacto ambiental.

  Por medio de un análisis de regresión se estimaron los parámetros K y α de la ecuación $\dot{u} = K(R/\sqrt[3]{W})^{\alpha}$ en escala logarítmica, ecuación que es usada para la predicción de la velocidad resultante máxima.

  Para Mulaló se obtuvieron los valores $K = 104$ y $\alpha = -1.40$, con R^2 de 0.26; para San Marcos se obtuvieron $K = 20$ y $\alpha = -0.97$, con R^2 de 0.04. Sin embargo, dada la inhabilidad del método de mínimos cuadrados para "eliminar" *outliers* (datos extremos) las rectas no muestran la tendencia real de los datos, por lo cual se plantearon dos rectas basándose en la física del fenómeno y en la tendencia de los datos; de acuerdo con esto se obtuvo para Mulaló los valores de $K = 251190$ y $\alpha = -3.06$, y para San Marcos valores de $K = 1000000$ y $\alpha = -3.06$. Se pudo observar una diferencia en el valor K entre San Marcos y Mulaló, que posiblemente es debida a cambios en la impedancia de los suelos en cada una de las poblaciones (posiblemente mayor en Mulaló que en San Marcos) o a problemas con los datos.

- Finalmente se discutió que las principales causas de la dispersión de los datos respecto a la relación empírica puede ser debida a la poca cobertura en ordenes de magnitud de la variable distancia escalada, pero principalmente al uso de la carga total ya que no se contaba con información detallada respecto a la carga detonada por unidad de tiempo, que es el valor que debiera ser utilizado en esta relación. ■

BIBLIOGRAFÍA

V. V. Adushkin, V. N. Kostuchenko, L. M. Pernik, y D. D. Sultanov V. I. Zcikanovsky. Seismic and source characteristics of large explosions. Reporte Final B239744, Institute for Dynamics of the Geospheres, Moscú, 1995.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Control de vibraciones producidas por voladuras. Norma UNE 22-381-93, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 1993.

K. Aki y P. G. Richards. *Quantitative Seismology – Theory and Methods*, volume 1. W. H. Freeman, San Francisco, 1980.

A. E. Barnes. The calculation of instantaneous frequency and instantaneous bandwidth. *Geophysics*, 57(11):1520 – 1524, 1992.

A. E. Barnes. Instantaneous spectral bandwidth and dominant frequency with applications to seismic reflection data. *Geophysics*, 58(3):419 – 428, 1993a.

A. E. Barnes. When the concepts of spectral frequency and instantaneous frequency converge. *The Leading Edge*, 12(10):1020 – 1024, 1993b.

A. E. Barnes. The complex seismic trace made simple. *The Leading Edge*, 17(4):473 – 477, 1998.

D. Bernal y B. Gunes. Prediction and calculation of construction vibrations. In *24th Annual Members'Conference and Equipment Exposition*, Austin, 2000.

B. Boashash, P. O'Shea, y B. Ristic. Statistical/computation comparison of some estimators for instantaneous frequency. In *Proc. IEEE ICASSP 91*, pages 3193 – 3196, Toronto, 1991.

G. A. Bollinger. *Blast Vibration Analysis*. Southern Illinois University Press, 2 edition, 1980.

S. Braun y M. Feldman. Time-frequency characteristics of non-linear systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(4):611 – 620, 1997.

F. W. Brown. Determinations of basic performance propeties of blasting explosives. *Quarly, Colorado School of Mines*, 51(3), Julio 1956.

S. C. Chapra y R. P. Canale. *Métodos Numéricos para Ingenieros*. McGraw Hill, México, 3 edition, 1999.

A. L. Chopra. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey, 2 edition, 2001.

J. Claerbout. *Fundamentals of geophysical data processing*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1976.

J. Claerbout. *Earth Soundings Analysis: Processing versus Inversion*. Blackwell Science, Cambridge, 2 edition, 1992.

E. J. Cording, A. J. Hendron, W.H. Hasmire, H. MacPherson, R. A. Jones, y T. D. O'Rourke. Method for geotechnical observations and instrumentation in tunneling. Reporte, Universidad de Illinois, Urbana, 1974.

P. W. Coton. Appropiate FFT spectral scales. *Geophysics*, 63(2):648 – 651, 1998.

R. A. Dick. Factors in selecting and applying commercial explosives an balasting agents. Circular Informativa 8405, U.S. Bureau of Mines, Washington, 1968.

Deutsches Institut für Normung e.V. DIN. Vibration in buildings - part 3: Effects on structures. Norma DIN4150-3, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2001a.

Deutsches Institut für Normung e.V. DIN. Vibrations in buildings - part 1: Prediction of vibration parameters. Norma DIN4150-1, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2001b.

Deutsches Institut für Normung e.V. DIN. Vibrations in buildings - part 2: Effects on persons in buildings. Norma DIN4150-2, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2001c.

C. H. Dowding. *Construction Vibrations*. Prentice Hall, New York, 2 edition, 2001.

F. Favela. Excavaciones y terracerías. `http://www.unam.mx/terracerias/indice.html`, Diciembre 2001.

M. Feldman. Non-linear system vibration analysis using hilbert transform - i. free vibration analysis method "FREEVIB". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 8(2):309 – 318, 1993a.

M. Feldman. Non-linear system vibration analysis using Hilbert Transform - ii. forced vibration analysis method "FORCEVIB". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 8(3): 309 – 318, 1993b.

M. Feldman. Non-linear free vibration identification via the Hilbert tranform. *Journal of Sound and Vibration*, 208(3):475 – 489, 1997.

P. Flandrin y J. Stockler. *Time-frequency/Time-scale Analysis*. Academic Press, 1999.

R. M. Gray y L. D. Davisson. *An Introduction to statistical signal processing*. Stanford University, 1999.

W. Griem y S. Griem-Klee. Mineralogía. `http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/geologiageneral/ggcap02.htm`, Julio 2001.

J. Grob. *GCR-12/GCR-16 Operation Manual*. GeoSys AG., Glattbrugg, Suiza, diciembre 1997.

R. B. Herrman. Some aspects of Band-Pass filtering of surface waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63(2):663 – 671, 1973.

N. E. Huang, Z. Shen, S. T. Long, M. Wu, H. H. Shih, N. Yen, C. C. Tung, y H. H. Liu. The empirical mode descompsition an the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In *Proc. R. Soc. Lond. A*, pages 903 – 995, London, 1998.

Ingeominas. Estudio de voladuras para determinar el efecto de las vibraciones generadas por la explotación de la mina Guativas en inmediaciones de Une - Cundinamarca. Technical report, Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental Y Nuclear, Ingeominas, Bogotá, 1996.

International Organization for Standardization ISO. Mechanical vibration and shock – vibration of buildings – guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. Estandar Internacional ISO 4866, International Organization for Standardization, Genève, Agosto 1990.

International Organization for Standardization ISO. Mechanical vibration and shock – vibration of buildings – guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings – amendement 1. Estandar Internacional ISO 4866-1, International Organization for Standardization, Genève, Diciembre 1994.

International Organization for Standardization ISO. Mechanical vibration and shock – vibration of buildings – guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings – amendement 2. Estandar Internacional ISO 4866-2, International Organization for Standardization, Genève, Diciembre 1996.

P. J. Loughlin y K. L. Davidson. Instantaneous kurtosis. *IEEE Signal Processing Letters*, 7 (6):156 – 159, 2000.

P. J. Loughlin y B. Tacer. Comments on the interpretation of instantaneous frequency. *IEEE Signal Processing Letters*, 4(5):123 – 125, 1997.

R. J. Lutton. Review and analysis of blasting and vibrations at Bankhead Lock. Reporte Técnico S-76-6, U.S. Army Engineer Waterways, Vicksburg Massachusetts, Junio 1976.

MathWorks. *Signal Processing Toolbox User's Guide*. The MathWorks, Natick, Masachusets, 2000.

Cementos del Valle. Informe sobre estudio de los efectos de las voladuras de la mina de La Calera. Technical report, Universidad de los Andes, Bogotá, 1988.

Cementos del Valle. Estudio de los efectos de las voladuras de las minas de La Calera (Valle) de Cementos del Valle. Technical report, Universidad de los Andes, Bogotá, 1992.

Cementos del Valle. Estudio de vibraciones de terreno generadas por voladuras en la mina La Calera, Mulaló. Technical report, Observatorio Sismologico del SurOccidente, Universidad del Valle, Cali, 1999.

Cementos del Valle. Estudio de vibraciones de terreno generadas por voladuras en la mina La Calera, Estudio de emplazamiento para la estación Mulaló. Technical report, Corporación OSSO, Cali, 2000.

Cementos del Valle. Estudio de vibraciones de terreno generadas por voladuras en la mina La Calera, Informe de Avance. Technical report, Corporación OSSO, Cali, 2001.

Cementos del Valle. Estudio de vibraciones de terreno generadas por voladuras en la mina La Calera, Informe Agosto 2002. Technical report, Corporación OSSO, Cali, 2002.

Municipio de Yumbo. Plan Básico de Ordenamiento Territorial –PBOT– del Municipio de Yumbo. Technical report, Municipio de Yumbo, Yumbo (Colombia), 1997.

Scottish Executive. Controlling the environmental effects of surface mineral workings: The control of blasting at surface mineral workings. Estandar PAN50 Anexo D, Scottish Executive, Edinburgo, Enero 2000.

A.Ñivia. Mapa Geólogico del Departamento del Valle del Cauca –escala 1:250000– Memoria explicativa. Technical report, Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental Y Nuclear, Ingeominas, Bogotá, 2001.

Office of the Chief of Engineers OCE. Engineering and design, systematic drilling and blasting for surface excabations. Manual Técnico EM 1110-2-3800, Department of the Army, 1972.

K. Ogata. *Dinamica de sistemas*. Prentice Hall, México, 1987.

A. V. Oppenheim y R. W. Shafer. *Digital signal processing*. Prentice Hall, New York, 1972.

A. V. Oppenheim, R. W. Shafer, y J. R. Buck. *Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto*. Prentice Hall, Madrid, 2 edition, 2000.

D. B. Percival y A. T. Walden. *Spectral analysis for physical applications – Multitaper and conventional univariate techniques*. Cambridge University Press, Cambridge, 1993.

P. Persson, R. H., y J. Lee. *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press, New York, 1994.

J. Picone, D. P. Prezas, W. T. Hartwell, y J. L. LoCicero. Spectrum estimation using an analytic signal representation. *Signal Processing*, 15(2):169 – 182, 1988.

J. G. Proakis y D. G. Manolakis. *Tratamiento digital de señales*. Prentice Hall, Madrid, 3 edition, 1998.

A. G. Rossberg. The power spectrum does not tell frequency. *Enviado a Phys. Rev. Lett*, 2002.

D. R. Russell, R. B. Herrman, y H. J. Hwang. Application of frequency variable filters to surface wave amplitud analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78(1):339 – 354, 1988.

T. E. Scheuer y D. W. Oldenburg. Local phase velocity from complex seismic data. *Geophysics*, 53(12):1503 – 1511, 1988.

I. Sebos. Groundshock enhancement due to reflections. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 4(9), Julio 1999.

D. E. Siskind, S. V. Crum, y M.Ñ. Plis. Blast vibrations and other potencial causes of damage in homes near a large surface coal mine in Indiana. Reporte de Investigación USBM RI 9455, U.S. Bureau of Mines, Minneapolis, 1993.

P. Steeghs y G. Drijkoningen. Seismic sequance analysis and attribute extraction using quadratic time-frequency representations. *Geophysics*, 66(6):947 – 1949, 2001.

T. P. H. Steeghs. *Local Power Spectra and Seismic Interpretation*. PhD thesis, Universidad de Delft, Septiembre 1997.

M. T. Taner, F. Koehler, y R. E. Sheriff. Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 44 (6):1041 – 1063, 1979.

W. T. Thomson. *Teoria de vibraciones*. Prentice Hall, México, 2 edition, 1982.

U.S Army Corps of Engineers USACE. Blasting vibration damage and noise prediction and control. Manual Técnico TL 1110-1-142, Department of the Army, 1989.

R. E. White. Properties of instantaneous seismic attributes. *The Leading Edge*, 10(7):26 – 33, 1991.

A. TABLAS Y FIGURAS

Tabla A.1. Valores guía máximos para velocidad de partícula DIN4150:1999

	Clase de construcción	Frecuencia fundamental			NS[a] TF[b]
		1 a 10 Hz	10 a 50 Hz	50 a 100 Hz	
1	Edificaciones industriales, oficinas y similares o con diseños robustos	20[c]	20 – 40	40 –50	40
2	Edificaciones residenciales y construcciones similares	5	5 – 15	15 – 20	15
3	Otras edificaciones sensibles a vibraciones o las no incluidas en las dos anteriores clases	3	3 – 8	8 –10	8

Adaptado de DIN (2001a).
[a] Nivel Superior componente horizontal.
[b] Todas las frecuencias.
[c] Velocidades de partícula en mm/s.

Tabla A.2. Velocidades pico recomendadas por la DIN 4150:1979.

	Clase de Edificación	Valores Indicativos	
		VPP[a] (mm/s)	VVP[b] (mm/s)
I	Residencias, oficinas y otras similares construidas de forma tradicional y en condiciones normales	8	4.8 – 8
II	Edificaciones estables en condiciones normales	30	18 – 30
III	Otras edificaciones y monumentos históricos	4	2.4 – 44

Tomado de Persson et al. (1994).
[a] Velocidad de Partícula Pico.
[b] Velocidad Vertical Pico.

Tabla A.3. Rangos típicos de respuesta estructural para varios tipos de fuentes de la ISO (1990)

Tipo de Vibración	Frecuencia [Hz]	Amplitud [μm]	V.P.[a] [mm/s]	A.P.[b] [mm/s^2]	Caract. temporal	Variable Medida
Trafico						
carreteras, rieles, vibraciones	1 – 80	1 – 200	0,2 – 50	0,02 – 1	C/T	vp
Voladuras						
vibraciones	1 – 300	100 – 2500	0,2 – 500	0,02 – 50	T	vp
Hincado de pilotes						
vibraciones	1 – 100	10 – 50	0,2 – 50	0,02 – 2	T	vp
Maquinaria[c]						
vibraciones	1 – 300	10 – 1000	0,2 – 50	0,02 – 1	C/T	vp/ac
Maquinaria[d]						
vibraciones	1 – 1000	1 – 100	0,2 – 30	0,02 – 1	C/T	vp/ac
Actividad humana						
a) Impacto	0,1 – 100	100 – 500	0,2 – 20	0,02 – 5	T	vp/ac
b) Directa	0,1 – 12	100 – 5000	0,2 – 5	0,02 – 0,2		
Sismos	0,1 – 30	10 – 10^5	0,2 – 400	0,02 – 20	T	vp/ac
Viento	0,1 – 10	10 – 10^5			T	ac

Tomado de ISO (1990).
[a] Velocidad de partícula.
[b] Aceleración de partícula.
[c] Maquinaria fuera de edificación.
[d] Maquinaria dentro de edificación.
Convenciones:
C = Continuo.
T = Transitorio.
vp = Registro de velocidad de partícula (sensores de velocidad).
ac = Registro de aceleración (acelerómetros).

Tabla A.4. Visión sinóptica de las normas analizadas

	Norma							
	DIN	PAN	USBM	OSM	UNE	ISO	SN	SS
Aplicación								
voladuras	•	•	•	•	•	•	•	•
maquinaria	•					•	•	
trafico	•					•	•	
Variables								
Frecuencia	•	•	•		•	•	•	
vel. partícula	•	•	•	•	•	•	•	
vel. x componente	•	•		•				•
acel.						•		
valores	•	•	•	•	•		•	•
Sensor								
geófono	•	•	•	•	•	•	•	•
acelerómetro					•	•		
Tipo								
residencial	•	•	•	•	•	•	•	•
industrial	•				•	•	•	•
ed. históricas	•	•			•	•	•	•
materiales			•			•	•	•
otros	•	•				•	•	
Solicitaciones						•	•	
Geología					•			•
Tipo análisis								
Semiperiodo	•	•		•	•	•	•	•
Fourier	•	•	•	•	•	•	•	•
Respespuesta					•	•	•	
Sitio medición								
Edificación	•	•	•			•	•	
Suelo	•	•	•	•	•	•		•

• Característica presente en la norma.

Figura A.1. Mapa de la ubicación geografica del proyecto

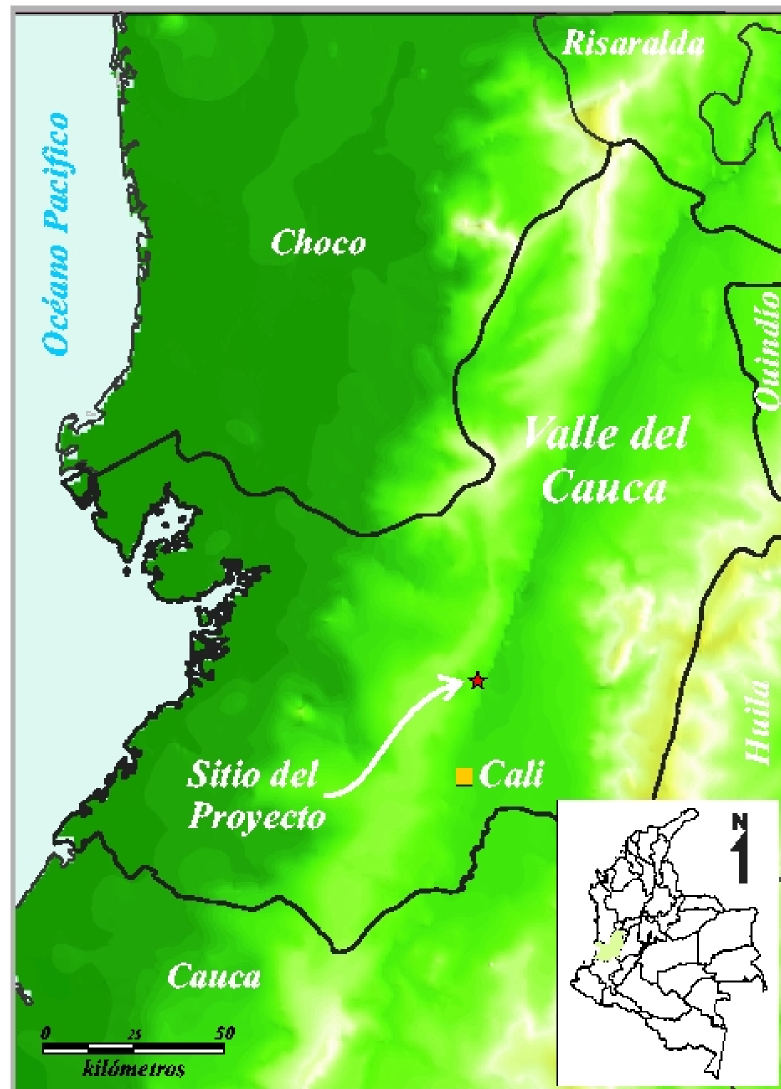


Figura A.2. Localización de las estaciones sismológicas para la observación de vibraciones producidas por voladuras en la mina La Calera Cementos del Valle

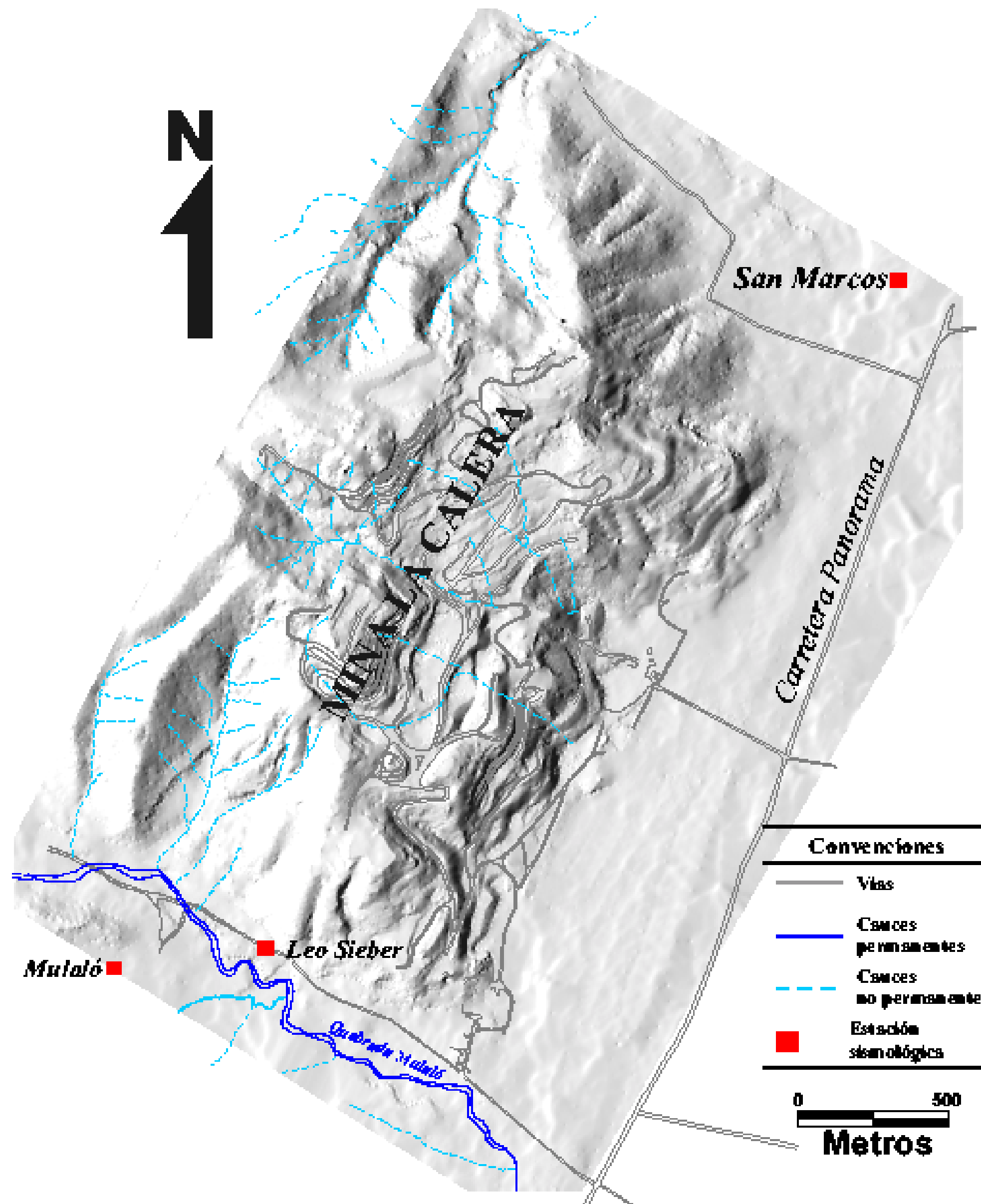


Figura A.3. Mapa de las voladuras realizadas en el periodo junio 1999 a agosto 2002

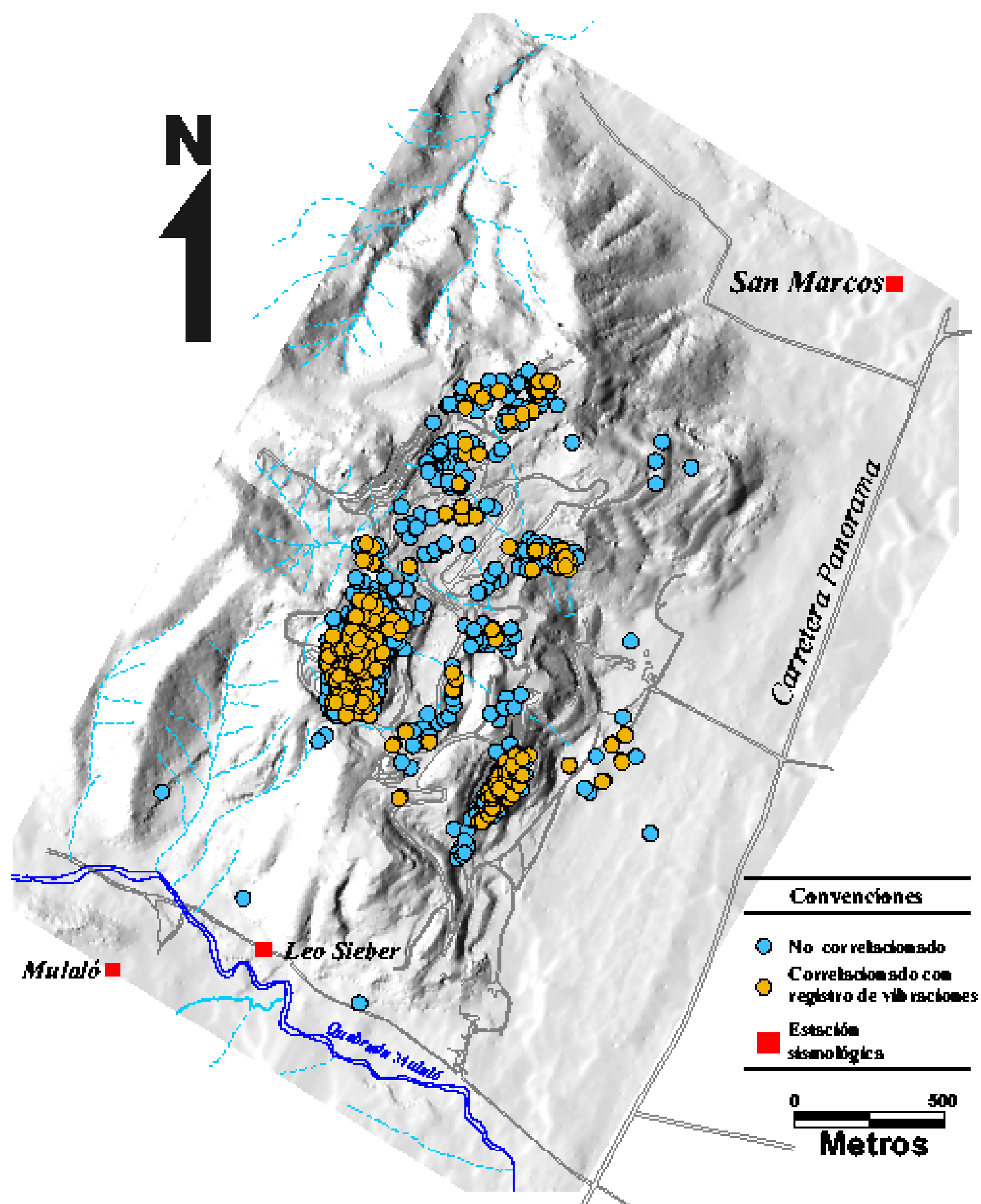


Figura A.4. Mapa de voladuras del periodo junio 1999 a agosto 2002 correlacionada con registros de vibraciones, -a- distribución general, -b- registrado en San Marcos, -c- registrado en la estación Sieber y -d- registrado en Mulaló.

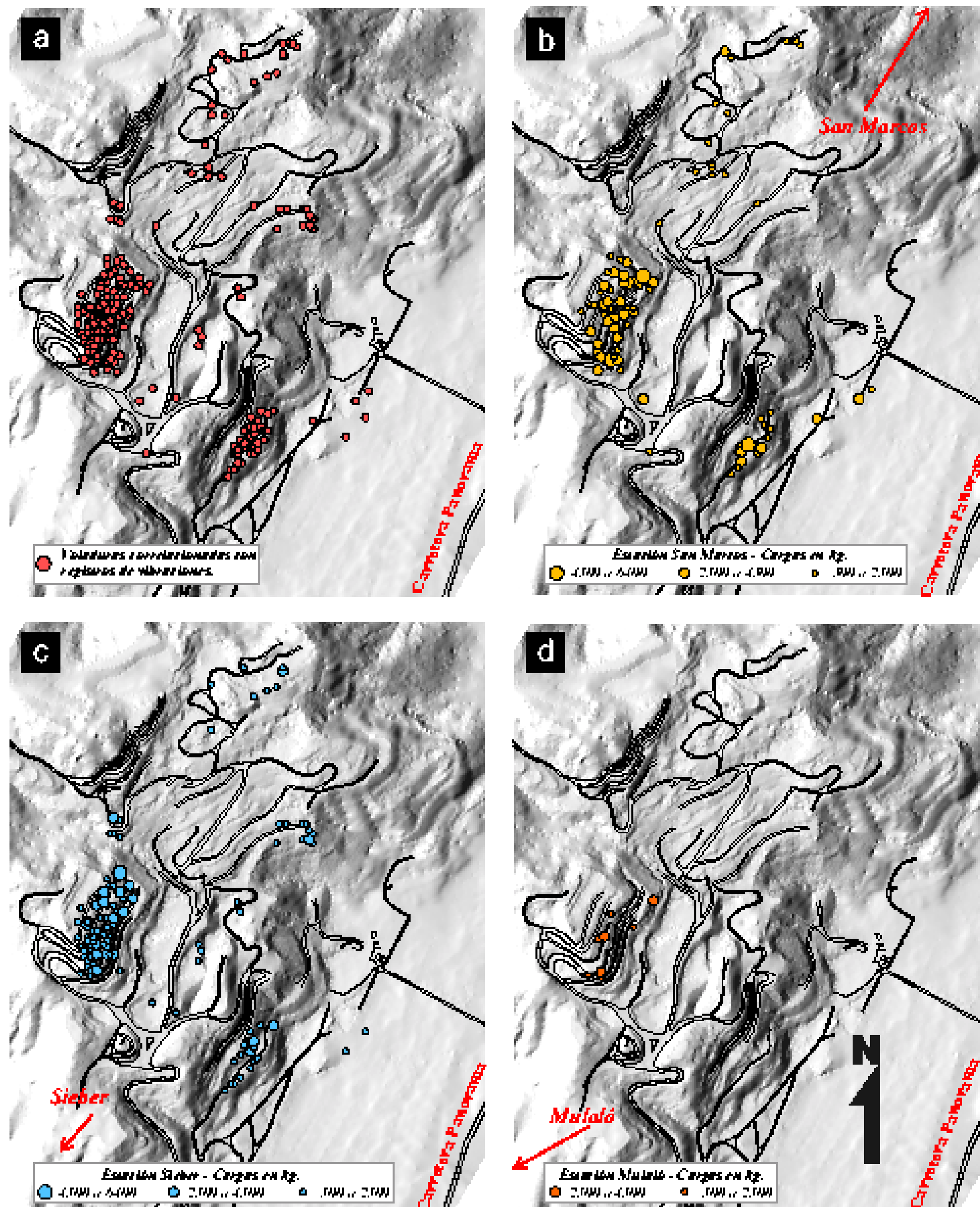


Figura A.5. Foto aérea panorámica de la mina La Calera tomada en dirección noroeste y la ubicación de las estaciones de monitoreo de vibraciones: San Marcos y Sieber (fecha: 199?)



Fuente: PBOT Municipio de Yumbo (1997).

Figura A.6. Foto aérea panorámica de la mina La Calera tomada en dirección oeste y la ubicación de las estaciones de monitoreo de vibraciones: Mulaló y Sieber (fecha: 1996)



Figura A.7. Señal seno y su frecuencia instantánea

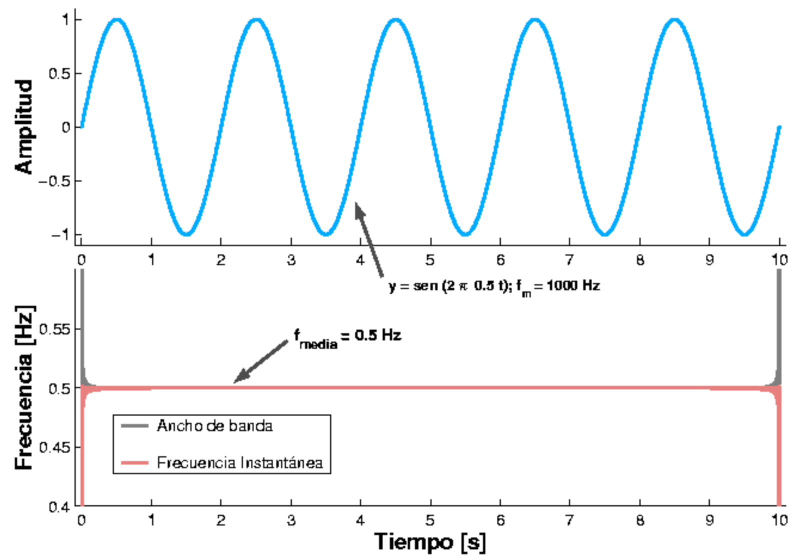


Figura A.8. Suma de dos señales seno y su frecuencia instantánea

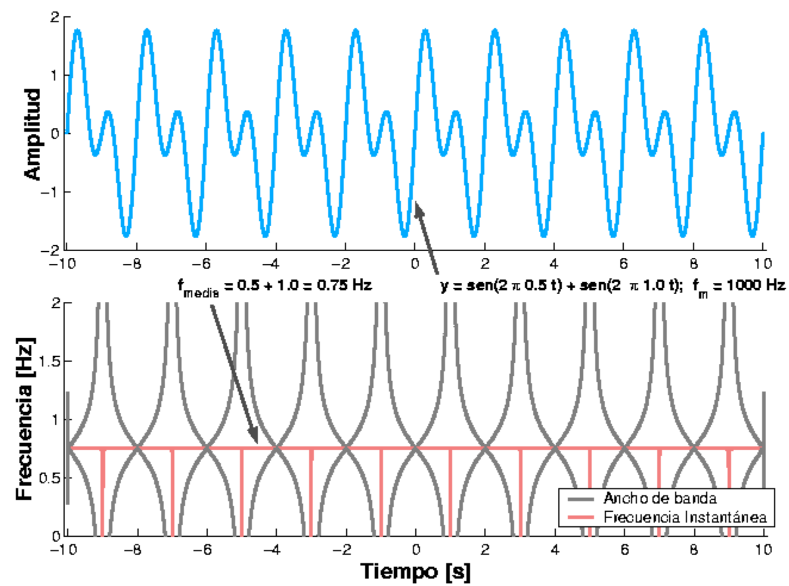


Figura A.9. Registro de vibraciones de una voladura y frecuencia instantánea (fecha: abril 7 de 2000)

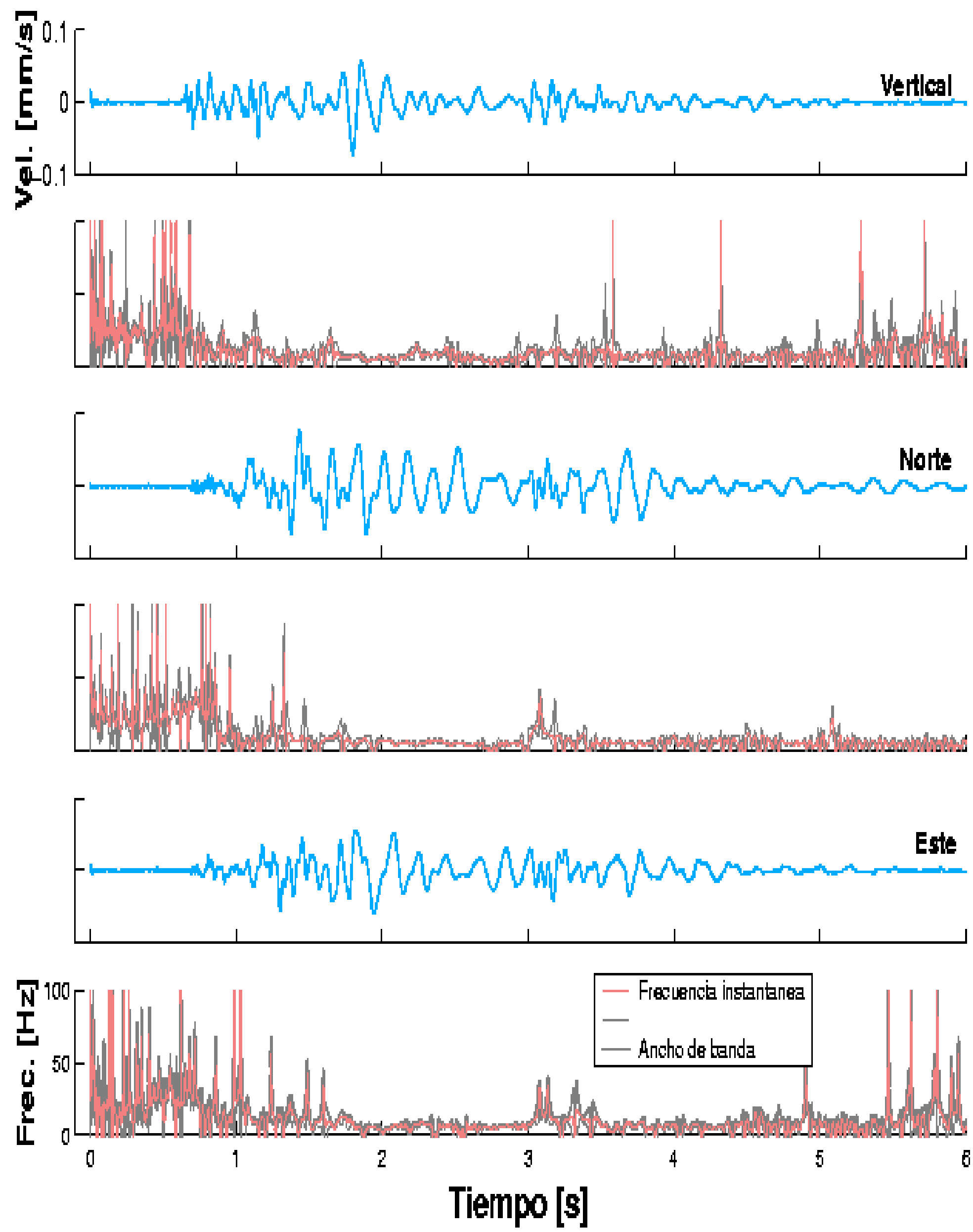
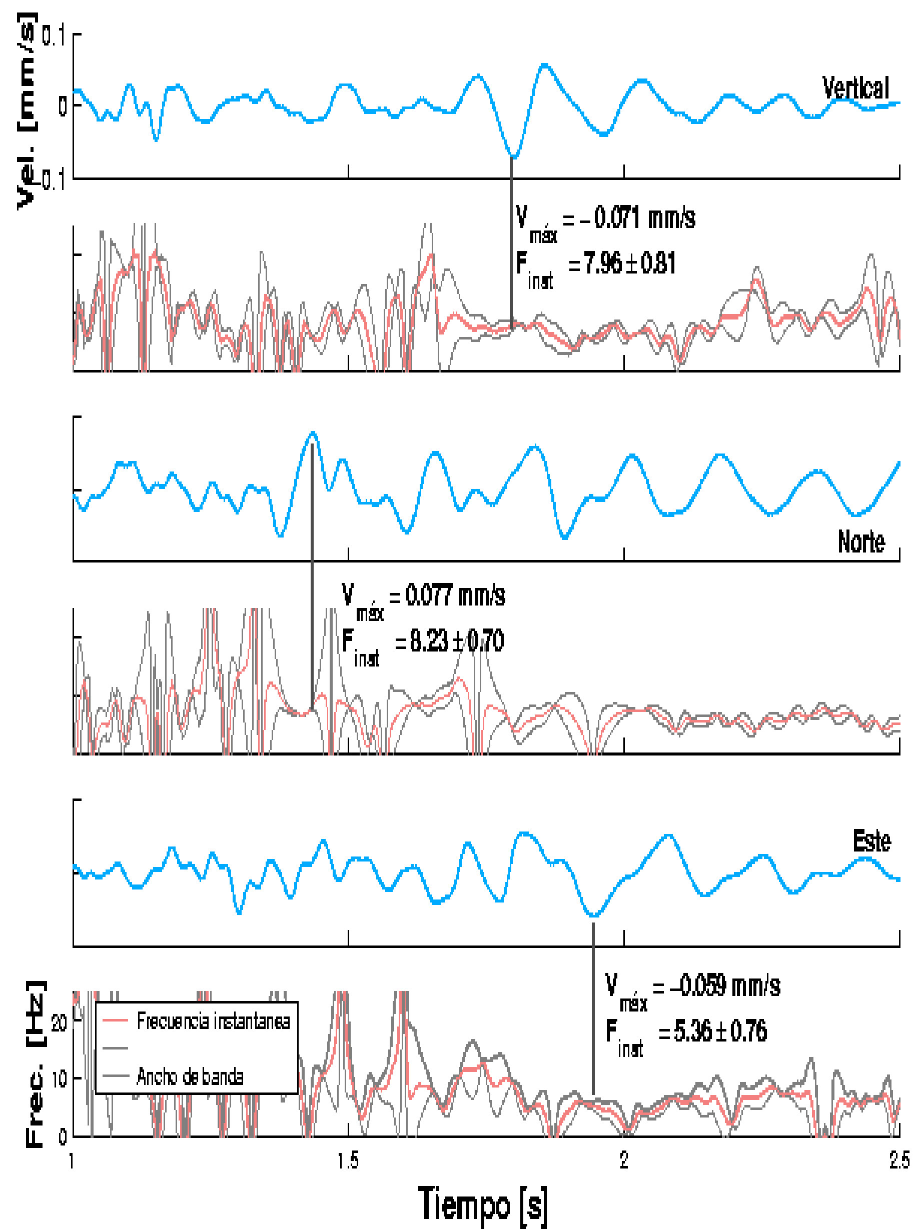


Figura A.10. Ampliación entre 1 y 2.5 s y entre 0 y 25 Hz del registro de vibraciones de voladura de abril 7 de 2000



B. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE VOLADURAS

B.1. Introducción

Bajo suposiciones generales, la complejidad de los registros de vibraciones (obtenidos en un sitio lejano al lugar de la explosión) generadas por voladuras se debe a varios aspectos, entre ellos: la fuente (proceso de voladura en si), el camino o trayectoria que las ondas recorren y el tipo de sensor con el que se miden. Aunque las vibraciones producidas por voladuras no son tan complejas como las producidas por un sismo (en el cual la fuente es desconocida y cuyos registros son obtenidos generalmente a grandes distancias y con trayectorias mucho mas complejas), estas vibraciones sí tiene algunas variables en el proceso de voladura –la fuente– que lo hacen no trivial.

Para entender los procesos de las voladuras que influyen en la generación de vibraciones, es indispensable el estudio, aunque sea a nivel básico, de de los materiales y métodos utilizados. En este anexo se presenta a manera de introducción y de forma muy general, el tema de los explosivos y sus propiedades, las clases de explosivos utilizadas en trabajos de minería superficial y algunos conceptos básicos sobre las técnicas utilizadas en voladuras.

B.2. Explosivos y sus propiedades

B.2.1. Reseña histórica

La sustancia más antigua utilizada como explosivo es la pólvora negra que consiste en una mezcla formada por 75 % de nitrato de potasio, 10 % de carbón y 15 % de azufre. Esta sustancia fue presumiblemente desarrollada por los chinos y en un comienzo era utilizada exclusivamente en exhibiciones pirotécnicas relacionadas con sus celebraciones.

Es probable que la pólvora se introdujera en Europa procedente del Oriente Próximo; la primera referencia detallada del proceso de fabricación de este explosivo en Europa data del siglo XII en escritos del monje Roger Bacon. Hacia el siglo XIV gracias al monje alemán Berthold Schwarz, este producto fue utilizado en actividades militares. Europa fue el lugar donde este material se utilizo por primera vez con fines benéficos en las areas de la construcción y la minería.

Un posterior desarrollo substituye el nitrato de potasio por clorato de potasio, y luego por nitrato de sodio, estos cambio resultaron en un explosivo mucho más potente. La pólvora puede fabricarse solamente con carbón y azufre, pero como es un explosivo combustible necesita oxígeno, por lo que para estallar en un barreno necesita una tercera substancia

(clorato de potasio, Nitrato de sodio o el nitrato de potasio) que con el calor se descomponga desprendiendo oxígeno.

La nitroglicerina fue descubierta hacia el año 1840 por el químico italiano Ascani Sobrero. Este explosivo (compuesto de glicerol, ácido nítrico y sulfúrico) resultó ser muy potente pero a la vez muy sensible a la presión y temperatura, lo que lo hace muy peligroso; unos años después de este descubrimiento, el químico Sueco Alfred Novel resolvió el problema de sensibilidad de la nitroglicerina al mezclar esta con una substancia inerte que puede ser una tierra dictomacea, a esta nueva sustancia se le llama dinamita nitroglicerina.

Durante los últimos 60 años el Nitrato de Amonio ha desempeñado un papel cada vez más importante en los explosivos. Se usó primeramente como ingrediente de la dinamita y, hace aproximadamente un cuarto de siglo, comenzó a emplearse en una sencilla y económica mezcla con el Diesel que ha constituido una revolución en la industria de los explosivos y que, hoy día, cubre aproximadamente el 80 % de las necesidades de los explosivos (Favela, 2001).

En los últimos 20 años se han desarrollado explosivos de geles de agua con base de nitrato de amonio. Estos explosivos contienen sensibilizadores, tales como los nitratos de amina, el *TNT* y el aluminio, así como agentes de gelificación y otros materiales, con el fin de alcanzar un grado de sensibilidad deseado.

Actualmente los explosivos se utilizan extensivamente en todo el mundo en canteras a cielo abierto, como el caso de la mina La Calera, minas en subterráneas y canteras de materiales. Los explosivos también se utilizan en diversas obras civiles como en la construcción de presas, sistemas de conducción eléctrica, gasoductos, oleoductos, sistemas de drenaje, vias, canales, túneles, compactación de suelos y muchas otras aplicaciones.

B.2.2. Propiedades de los explosivos

Cada tipo de explosivo tiene características propias definidas por sus propiedades, para el mismo tipo de explosivo las características pueden variar dependiendo del fabricante; el conocimiento de tales propiedades es un factor importante en el diseño de voladuras. Las propiedades mas importantes de los explosivos son: fuerza, densidad de empaque, velocidad de detonación, sensibilidad, resistencia al agua, emanaciones e inflamabilidad, estas se trataran a continuación.

B.2.2.1. Fuerza La fuerza en un termino tradicionalmente usado para describir varios grados de explosivos, aunque no es una medida real de la capacidad de estos de realizar trabajo; a este termino en ocasiones se le llama potencia y se origina de los primeros métodos para clasificar dinamitas (OCE, 1972; USACE, 1989; Favela, 2001).

La fuerza es generalmente expresada como un porcentaje que relaciona el explosivo estudiado con un explosivo patron (nitroglicerina). El porcentaje puede ser expresado de dos formas: 1) comparando los pesos del explosivo analizado y el patron ("Fuerza por peso"), 2) comparando los explosivos con un volumen base y que comunmente es un cartucho de explosivo ("Fuerza por cartucho").

Un ejemplo de como se comparan explosivos en fuerza por peso es: 1 kg de dinamita extra con 40 % de fuerza por peso es equivalente a 1 kg de gelatina amoniacal (En Colombia Indugel) con 40 % de fuerza por peso; la diferencia entre estas dos está en su diferente velocidad de detonación. Una comparación errada es suponer que un explosivo de 50 % en fuerza por peso es dos veces mas fuerte que uno de 25 % o cinco veces uno de 10 %, estas relaciones no son correctas debido principalmente a que los explosivos de mayor fuerza ocupan casi el mismo espacio en el barreno, pero producen más gases y por lo tanto las presiones son mayores y el explosivo resulta más eficiente (Favela, 2001).

El termino fuerza fue aplicado cuando las dinamitas eran una mezcla de nitroglicerina y un relleno inerte (normalmente diatomita o también llamada tierra dictomacea), entonces una dinamita al 60 % contenía 60 % de nitroglicerina por peso de dinamita y era tres veces mas fuerte que una dinamita de 20 %. Las dinamitas nuevas contienen rellenos activos tales como el nitrato de sodio, esto hace que ellas sean hasta 1,5 veces mas potentes que las antiguas.

Usualmente en las dinamitas se trabaja con la fuerza por peso, mientras que las gelatinas con la fuerza por cartucho. La fuerza no es una buena base para comparar explosivos, un mejor indicador que permite comparar explosivos es la presión de detonación (Dick, 1968)

B.2.2.2. Velocidad de detonación Es la velocidad con la cual la onda de detonación viaja por el explosivo, puede ser expresada para el caso de explosivos confinados como no confinados; por si misma es la propiedad más importante cuando se desea clasificar un explosivo. Como en la mayoría de casos el explosivo esta confinado en un barreno, el valor de velocidad de detonación confinada es el más importante.

La velocidad de detonación de un explosivo depende de: La densidad, de sus componentes, del tamaño de las partículas y del grado de confinamiento. Al disminuir el tamaño de las partículas dentro del explosivo, incrementar el diámetro de la carga o incrementar el confinamiento aumentan las velocidades de detonación (ver Figura B.1) Las velocidades de los explosivos inconfinados son generalmente del orden del 70 % al 80 % respecto a las velocidades de explosivos confinados.

La velocidad de detonación en un medio confinado para explosivos comerciales varia entre 1800 a 8000 m/s (USACE, 1989; OCE, 1972; Persson et al., 1994). La velocidad para algunos explosivos y agentes explosivos es sensible a cambios en el diámetro del cartucho y del barreno; cuando el diámetro se reduce, la velocidad se reduce hasta alcanzar un diámetro

Figura B.1. Propiedades relativas de los explosivos comerciales



Adaptado de Dick (1968)

critico en que no hay propagación de la onda de detonación y por lo tanto no hay explosión.

B.2.2.3. Densidad y gravedad especifica La densidad del explosivo es usualmente indicada en términos de gravedad especifica, la gravedad especifica de explosivos comerciales varia de 0.6 a 1.7. Los explosivos densos usualmente generan mayores velocidades de detonación y mayor presión; estos suelen ser utilizados cuando es necesaria una fina fragmentación de la roca. Los explosivos de baja densidad producen una fragmentación no tan fina y son usados cuando la roca esta diaclasada o en canteras en las que se extrae material grueso.

La densidad de los explosivos es importante en condiciones de alta humedad, ya que una densidad alta hace que el explosivo sea poco permeable. Un explosivo con gravedad especifica menor a 1.0 no se entrapa en agua.

B.2.2.4. Presión de detonación La presión de detonación, depende de la velocidad de detonación y de la densidad del explosivo, y es la sobrepresión del explosivo al paso de las ondas de detonación. La amplitud del la onda –de esfuerzo– transmitida al medio (roca) en una explosión esta relacionada con la presión de detonación. La reflexión del pulso de choque en la cara libre de la voladura es uno de los mecanismos que se utilizan para triturar la roca. La presión de detonación generalmente es una de las variables utilizadas en la selección del tipo de explosivo.

Existe una relación directa entre la velocidad de detonación y la presión de detonación; esto es, cuando aumenta la velocidad aumenta la presión. La relación entre la presión, velocidad

de detonación y densidad del explosivo se puede representar de la forma

$$P = 4,18 \times 10^{-7} \left(\frac{DC^2}{1 + 0{,}80D} \right) \tag{B.1}$$

(Brown, 1956), donde P es la presión de detonación y sus dimensiones son en kbar, D es la densidad y C la velocidad de detonación en pies/s.

Una alta presión de detonación (alta velocidad de detonación) es utilizada para fragmentar rocas muy duras como el granito (7 en la escala de Mohs[1] y una densidad aproximada de 2.5), mientras que en rocas suaves como los esquistos (rocas sedimentarias y metamórficas con menos de 4 en la escala de Mohs) puede ser necesaria una baja presión de detonación (baja velocidad de detonación) para su fragmentación; la roca caliza, que es el material que extrae Cementos del Valle en la mina La Calera, tiene una propiedad importante y es la de tener diferente dureza en direcciones perpendiculares, con 4.5 a 5 en escala de Mohs en dirección longitudinal y 6.5 a 7 en la escala de Mohs en dirección lateral (Griem y Griem-Klee, 2001).

B.2.2.5. Sensibilidad Es la medida de la facilidad de iniciación de los explosivos, es decir, el mínimo de energía, presión o potencia necesaria para que ocurra la iniciación. Lo ideal de un explosivo es que sea sensible a la iniciación mediante cebos (estopines) para asegurar la detonación de toda la columna de explosivo, e insensible a la iniciación accidental durante su transporte y manejo.

Una prueba estándar utilizada para determinar la sensibilidad de un producto explosivo es la sensibilidad al fulminante (los fulminantes están catalogados del número 4 al 12 y se diferencia en las cantidades de fulminato de mercurio y clorato de potasio), para esto se utiliza un fulminante número 6 (2 gramos de una mezcla de 80 % de fulminato de mercurio y 20 % de clorato de potacio), si el producto estalla al quemar este fulminante se dice que el producto es un explosivo, de lo contrario se le denomina agente explosivo. Adicionalmente para comparar las sensibilidades entre diferentes productos se utilizan fulminantes de diferente potencias, cuanto más alto sea el número de la cápsula mayor será la sensibilidad del explosivo.

B.2.2.6. Resistencia al agua La resistencia al agua en un explosivo es medida como la habilidad de resistir el agua sin deterioro o perdida de sensibilidad, más precisamente, es el número de horas que el explosivo puede estar sumergido en agua y aún ser detonado.

Si hay poca presencia de agua en el barreno o el tiempo entre la carga de los explosivos y la detonación es corto, entonces un explosivo con catalogación de resistencia al agua "Buena" puede ser suficiente; si el explosivo esta expuesto en un tiempo prolongado a el agua o esta

[1] La escala de Mohs mide la dureza relativa de los minerales, va desde 1 en el mineral de yeso hasta 10 en el diamante

se percola al barreno se debe utilizar un explosivo con catalogación de resistencia al agua "Muy buena" o "Excelente". En general los geles explosivos tienen la mejor resistencia al agua. Los explosivos de alta densidad tienen una una buena resistencia al agua, mientras que los de baja densidad tienen baja o ninguna.

B.2.2.7. Emanaciones La detonación de explosivos comerciales produce vapor de agua, dioxido de carbono y nitrógeno, los cuales, aunque no son tóxicos, forman gases asfixiantes como monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

B.2.3. Tipos de explosivos

Un explosivo es un compuesto químico o mezcla de componentes que, cuando es calentado, impactado, sometido a fricción o a choque, produce una rápida reacción exotérmica liberando una gran cantidad de gas y produciendo altas temperaturas y presiones en un breve instante de tiempo.

Los ingredientes utilizados en la fabricación de explosivos generalmente son: bases explosivas, transportadores de oxígeno, combustibles, antiácido y absolventes, algunos ingredientes realizan mas de una función en los explosivos. Una base explosiva es un liquido o solido que al aplicarsele suficiente calor, o al ser sometido a un choque fuerte, se descompone en gases con la liberación de una gran cantidad de calor. Los combustibles combinados con exceso de oxígeno previenen la formación de óxidos de nitrógeno. los transportadores de oxígeno aseguran la oxidación completa del carbon para prevenir la formación de monóxido de carbono. La formación de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono no es deseable ya que produce gran cantidad de humo, pero también es indeseable por que resulta en un bajo calor de detonación y por consecuencia poca eficiencia de la voladura. Los antiácidos son utilizados como estabilizantes en el almacenamiento. Los absorbentes absorben líquidos en bases explosivas (OCE, 1972).

Existen varios tipos de explosivos que son utilizados en canteras y en minería superficial, entre ellos están (Otra catalogación más elaborada se encuentra en Persson et al., 1994):

Dinamitas En esta catalogación entran todas las mezclas de nitroglicerina, diotomita y otros componentes; existen varios tipos como: nitroglicerina dinamita, Dinamita amoniacal de alta densidad (dinamita extra), dinamita amoniacal de baja densidad.

Geles Entre estos se encuentran los geles explosivos, que son fabricados a partir de nitrocelulosa y nitroglicerina; el *straight* gel, fabricado a partir de los geles explosivos y combustibles gelatinizados. Este explosivo generalmente tiene una consistencia plástica y es de de alta densidad; otro es el gel amoniacal (gel extra) y los semi-geles.

Agentes explosivos Son mezclas de combustibles y óxidantes, entre ellos tenemos los

agentes explosivos secos como el *ANFO* y las lechadas explosivas.

De la gran cantidad de explosivos, muchos de los cuales no se incluyen en la catalogación anterior, los más usados en canteras y minería son: los geles y los agentes explosivos; de estos se hablara a continuación.

B.2.3.1. Geles

B.2.3.1.1. Gel explosivo La gelatina (gel) explosiva es fabricada añadiendo nitrocelulosa a la nitroglicerina, también se le añade un antiácido para estabilizar la mezcla para su almacenamiento. Este explosivo tiene altas velocidades de detonación y un excelente comportamiento de resistencia al agua, pero emite un gran volumen de humo. Este es el explosivo comercial más potente, también es llamado *"oil well explosive"*.

B.2.3.1.2. straight gel Es un explosivo plástico denso fabricado a partir de nitroglicerina (o explosivos con base en petróleo gelatinizado), nitrocelulosa, carbon combustible [2] y sulfuro. Este tipo de geles tienen una excelente resistencia al agua (son a prueba de agua). Este explosivo es fabricado con una fuerza por peso (ver sección B.2.2.1 en la página 99) del 20 % al 90 %. Este tipo de explosivos es usado cuando se necesita fragmentar rocas muy duras, o en el fondo del barreno como inicializador de la un agente explosivo. El straight gel ha sido sustituido por el gel amoniacal, que es mas económico, aunque se sigue usando en trabajos que requieran un alto grado de resistencia al agua o en en trabajos bajo el agua.

Los straight geles tienen dos velocidades de detonación características, la más rápida ocurre cuando esta confinado mientras que velocidades mucho menores resultan de un confinamiento insuficiente o una presión hidrostática alta. Cuando existe una presión hidrostática externamente alta puede no inicializarse la voladura; también se han desarrollado geles de alta velocidad, que son iguales a los straight geles pero con una densidad ligeramente menor, más sensitivos a la detonación con velocidad de detonación constante aunque varíe el grado de confinamiento o la presión hidrostática aumente; este tipo de geles es utilizado particularmente en exploración geofísica.

B.2.3.1.3. Gel amoniacal En este tipo de gel explosivo es reemplazada una cantidad de nitroglicerina y nitrato de sodio por nitrato de amonio. Este gel explosivo se puede comparar con el *straight* gel en cuanto a su fuerza; el explosivo fue desarrollado como un reemplazo económico del *straight* gel. El gel amoniacal es fabricado con una fuerza por peso que varia entre 30 % y 80 %. Comparado con el anterior este tiene menor velocidades de detonación, menos resistencia al agua y genera menor cantidad de gases (lo que lo hace muy usado en minería subterránea). La gran fuerza (mayor a 70 %) hace que este explosivo sea un buen inicializador de los agentes explosivos.

[2] Combustible carbonaceo?

B.2.3.1.4. Semigeles La fuerza por peso de este tipo de explosivos varia entre el 60 % y 65 %. Este explosivo tiene las mismas propiedades que el gel amoniacal; los semigeles son usados como reemplazo de los geles amoniacales cuando es necesaria una mayor resistencia al agua; este explosivo es aun mas económico que el gel amoniacal. Los semigeles tiene velocidades de detonación entre 3200 y 3600 m/s, a diferencia de otros explosivos, este no se ve notoriamente afectado por el confinamiento.

En la tabla B.1 se incluyen algunas de las propiedades de los geles, tales como: Fuerza por peso y cartucho, gravedad especifica, velocidad de detonación en un medio confinado, resistencia al agua y calidad en emanaciones, conceptos que se explican en la sección B.2.2.

B.2.3.2. Agentes explosivos Los agentes explosivos consisten en una mezcla de combustible y agentes óxidantes, ninguno de los cuales se los considera explosivos (ver sensibilidad en la página 102). Un agente explosivo consiste de nitratos inorgánicos y combustible de carbon, puede contener otras sustancias no explosivas tales como polvo de aluminio o ferrosilicona, con el fin de aumentar su densidad. La adición de explosivos y calor de detonación, por ejemplo *TNT*, a este tipo de mezcla cambia la clasificación de agentes explosivos a explosivos. Debido a su incesibilidad los agentes explosivos deben ser inicializados por un explosivo.

B.2.3.2.1. Agentes explosivos secos El Agente explosivo seco mas utilizado es una mezcla de nitrato de amonio granuloso (similar al de los abonos) y combustible (diesel), a este explosivo se le llama *ANFO* por sus siglas en inglés *"Ammonium Nitrate – Fuel Oil"*. Este producto ha reemplazado a las dinamitas y gelatinas explosivas en voladuras de minas y canteras. En la practica este producto se fabrica con 94 % de nitrato de amonio y 6 % de combustible Diesel.

Un inadecuado cebado (proceso de inicialización del explosivo) en la carga de *ANFO* implica una baja velocidad de detonación inicial, esto lleva a fallo de la voladura. Para que esto no ocurra se utilizan explosivos de alta velocidad y presión distribuidos a lo largo del barreno que contiene *ANFO*. La velocidad de detonación en barrenos cargados con ANFO depende de el diámetro del barreno, a mayor diámetro mayor velocidad de detonación, como se observa en la tabla B.2. Diámetros menores a 7 cm no son recomendados (OCE, 1972).

La gravedad especifica del *ANFO* varia entre 0,75 y 0,95, dependiendo de la densidad y tamaño de las partículas del AN (Nitrato de Amonio). Las principales ventajas que tiene el *ANFO*sobre otros explosivos convencionales son: Es mas seguro por su baja sensibilidad, es fácil de cargar en los barrenos y tienen un precio muy bajo. En su forma fluida este agente explosivo tiene la ventaja adicional de llenar todos los espacios en el barreno, lo que asegura un eficiente uso del explosivo.

B.2.3.2.2. Lechadas explosivas Este tipo de agentes explosivos contiene nitrato de amonio en una solución acuosa. Dependiendo de los ingredientes pueden ser clasificados como agentes explosivos o como explosivos. Las lechadas explosivas (*slurry blasting*) contienen ingredientes no explosivos combustibles tales como carbon y aluminio, y por lo general no son sensitivos a detonación de cápsulas (ver sección sobre sensibilidad en la página 102) a menos que se incluya un explosivo como *TNT*.

La velocidad de detonación de este tipo de agentes explosivos varia entre 3700 y 5500 m/s, dependiendo del tipo de ingredientes utilizados, el diámetro del barreno, el grado de confinamiento y la densidad. Sin embargo, la velocidad de detonación de las lechadas explosivas no depende tanto de el diámetro del barreno como en el caso del *ANFO*.

La gravedad especifica de este tipo de agentes explosivos esta entre 1,1 y 1,6. La lechada explosiva tiene las mismas ventajas que los agentes explosivos tales como el *ANFO*, pero el rendimiento es mayor a ellos debido a que las velocidades de detonación y densidades son mayores.

B.3. Técnicas básicas utilizadas en voladuras

Las voladuras se realizan con varios propósitos, entre ellos: mover y remover roca, controlar superficies de las rocas en excavaciones y triturar la roca hasta un tamaño deseado; para alcanzar cada uno de estos propósitos se utilizan técnicas diferentes. En esta sección se muestran técnicas comúnmente empleadas en voladuras de minería superficial y excavaciones superficiales tales como patrones de voladuras y uso de retardos.

B.3.1. Patrones de voladuras

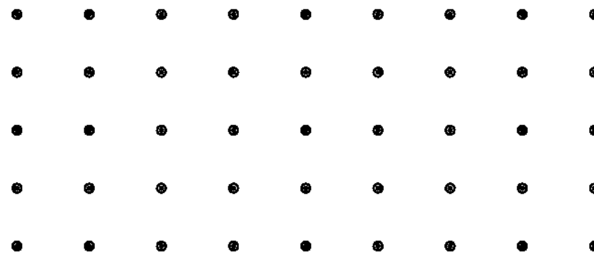
B.3.1.1. Distribución de barrenos - Plantillas - Mallas Las plantillas son configuraciones regulares de barrenos dispuesta en planta y en sección. Las configuraciones de barrenos pueden tener muchas formas, pero las mas usadas son: Fila única como se indica en la Figura B.3(a), arreglos rectangulares regulares como en la Figura B.3(b) y barrenos en patrón escalonado representado en la Figura B.3(c). También se utilizan patrones de arreglos semi-regulares o irregulares en áreas donde no se puedan utilizar patrones regulares.

Existen dos términos utilizados en los arreglos de barrenos: el primero, el "espaciamiento", que es la distancia lateral entre centros de barrenos; el segundo, el "borde", se define como la distancia desde una fila de barrenos y la cara de la excavación o la distancia entre filas que son detonadas en secuencia. Los arreglos de barrenos en perfil se caracterizan por la profundidad del barreno (o altura de barreno) y su inclinación (ver Figura B.3). En algunos casos se suelen mezclar barrenos a diferentes profundidades con el fin de obtener resultados

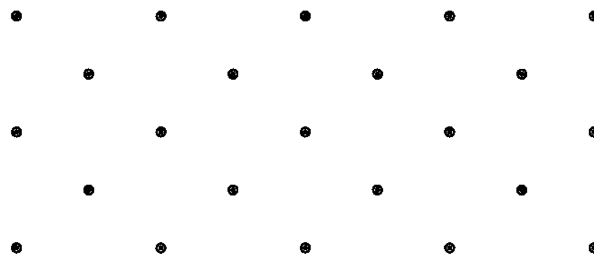
Figura B.2. Vista en planta de arreglos básicos de barrenos.



(a) Fila única



(b) Patron regular

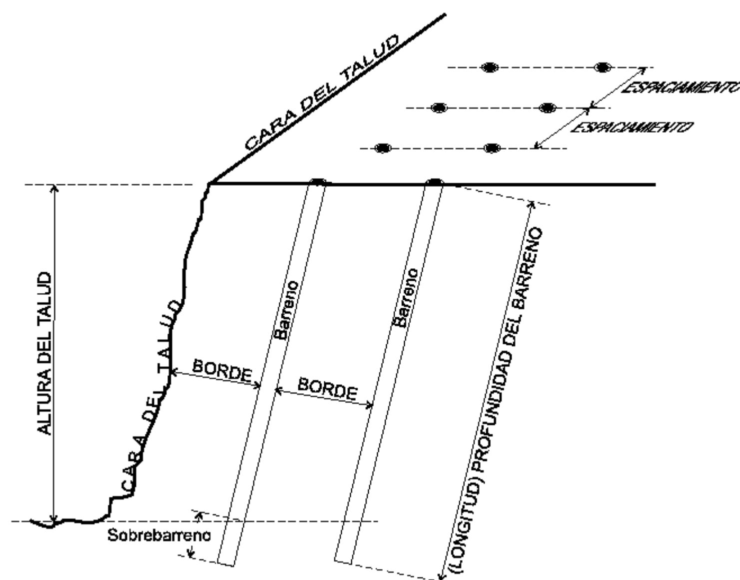


(c) Patron escalonado

particulares.

B.3.1.2. Voladuras de una sola carga En las voladuras con una sola carga existen dos técnicas usadas, la primera es realizar pequeñas voladuras de un solo barreno en bloques de roca medianos con el fin de fragmentarla para un mas fácil transporte, se muestra en la Figura B.5(a), a esta técnica de voladuras se le comúnmente "Volo". La otra técnica de una sola carga es usada en grandes movimientos de masa, consiste en usar una gran cantidad de explosivos dispuestos generalmente en túneles. Esta ha sido usada para la construcción de represas (Adushkin et al., 1995), sus dos principales configuraciones son: el "Hueco de serpiente", Figura B.5(b), que es un túnel con una sola cavidad para los explosivos y el "Túnel coyote" tiene forma de T como se muestra en la Figura B.5(c).

Figura B.3. Vista en perfil de un arreglo de barrenos.



B.3.2. Patrones de retardo

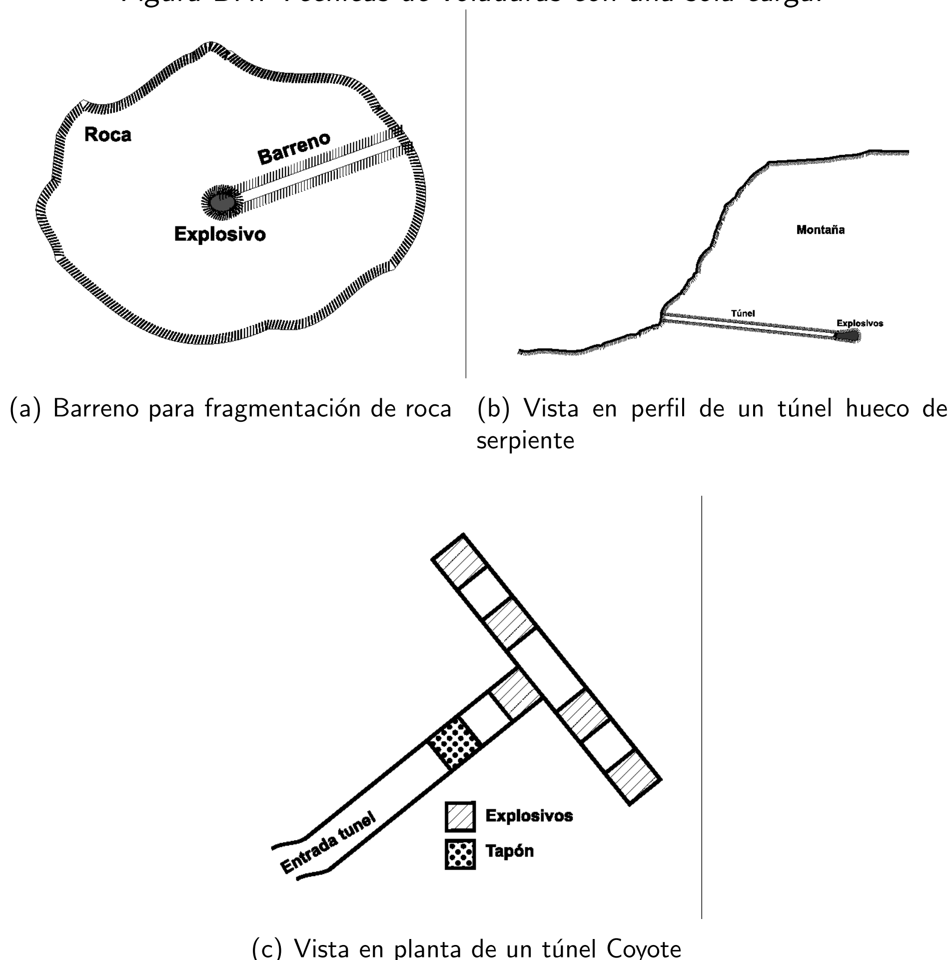
Las secuencia de retardo (secuenciación) consiste en detonar los barrenos en secuencias de tiempo predeterminados. Para obtener una secuencia de retardo se utilizan detonadores eléctricos, no eléctricos (micro-retardados), o cordon detonante. Los patrones de retardos mas utilizados son: retardo por fila, retardo por columna y retardo escalonado. Algunas secuencias típicas de retardo se muestran en la Figura B.6, la ultima de las cuales es usada en “La Calera” (ver secuencia en Figura B.5).

En minería superficial se usan plantillas de barrenos con patrones de retardo, el fin de mover y remover roca, conseguir una fragmentación de roca adecuada y controlar el nivel de vibraciones.

B.4. Explosivos y técnicas y su relación con las vibraciones

En el caso de las voladuras la energía (capacidad de realizar trabajo) es usada en el fracturamiento y movimiento de las rocas, así como en la generación y transmisión de vibraciones y ondas en el suelo y el aire. El trabajo realizado en el proceso de la voladura depende de la cantidad (peso) del explosivo utilizado. Para propósitos prácticos, puede suponerse que

Figura B.4. Técnicas de voladuras con una sola carga.



(a) Barreno para fragmentación de roca

(b) Vista en perfil de un túnel hueco de serpiente

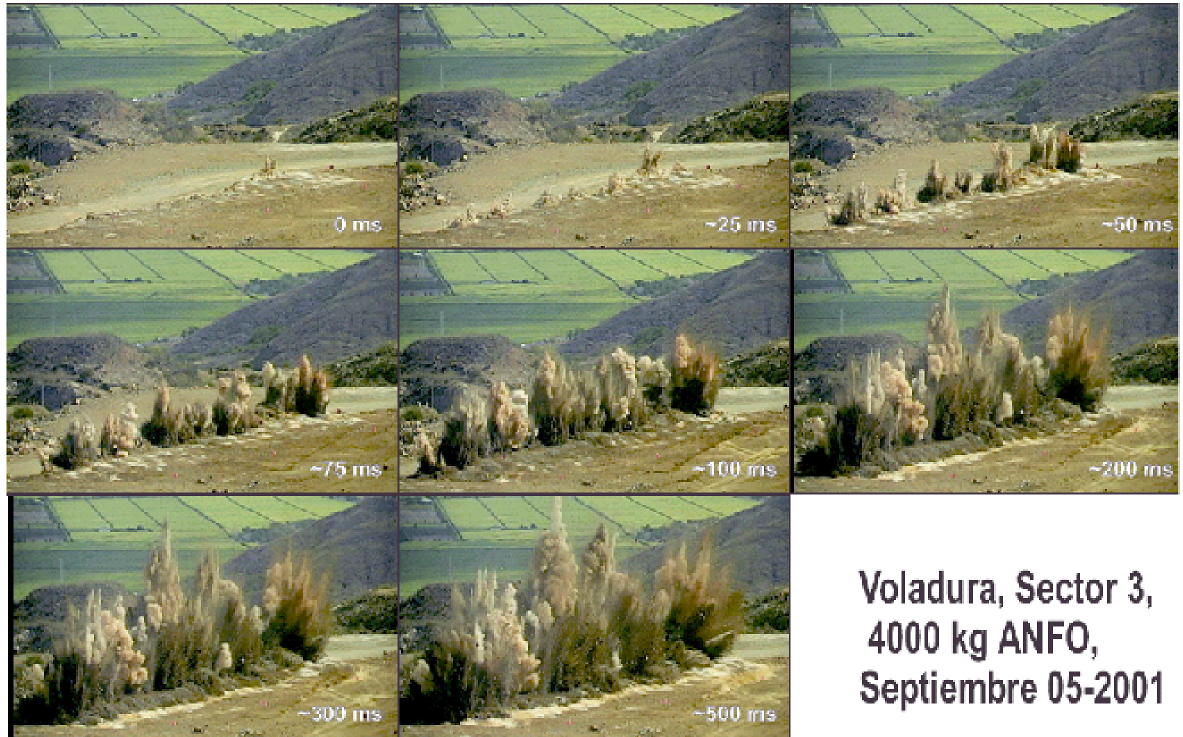
(c) Vista en planta de un túnel Coyote

todos los explosivos comerciales utilizados en la actualidad tienen la misma energía por por unidad de peso. La cantidad de explosivos detonados por instante de tiempo (definido generalmente como 8 ms) es la que determina la energía total liberada en la explosión. En física la energía es una cantidad que se expresa en unidades de fuerza por distancia, aunque no es estrictamente cierto pero es útil en voladuras la energía se relacionada con el peso del explosivo utilizado.

El grado de confinamiento de un explosivo determina la fracción de energía aprovechada en el fracturamiento de la roca y la magnitud de las vibraciones transmitidas al suelo y al aire. A mayor confinamiento, mas energía es utilizada en el fracturamiento de la roca y generación de vibraciones y menos en la generación de ondas acústicas. Adicionalmente el espaciamiento y la secuenciación de la voladura influyen en el grado de confinamiento de los explosivos.

El tipo de roca tiene una débil influencia en la velocidad de partícula máxima. Cuando la

Figura B.5. Fotos de la secuencia una voladura en la mina La Calera



densidad de las rocas es mayor (mayor velocidad de onda compresional -P-), es también mayor la velocidad de partícula cerca a la voladura, sin embargo, a grandes distancias puede ocurrir lo contrario.

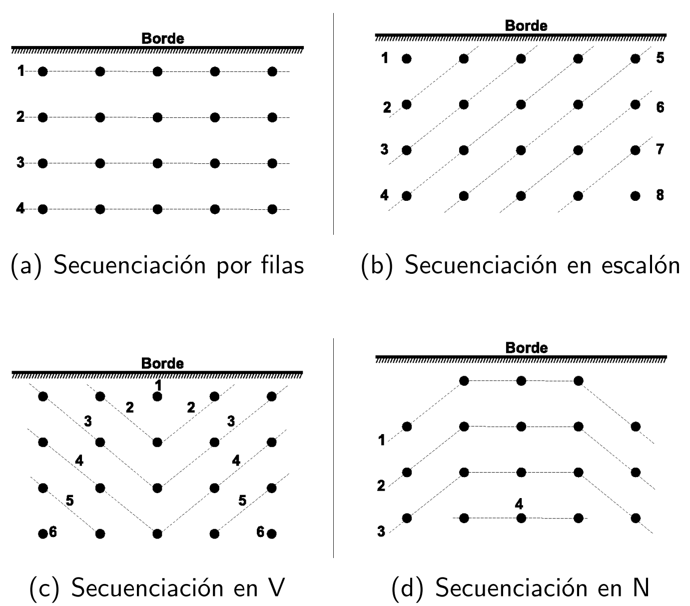
La atenuación es la variación de la velocidad de partícula pico con la distancia, para las voladuras generalmente se expresa como

$$V_{\text{res}} = K \left(\frac{R}{W^m} \right)^{-n} \tag{B.2}$$

(Persson et al., 1994; Dowding, 2001), donde A y n son parámetros estimados (denominados α o β en secciones anteriores), R es la distancia de la voladura a un sitio determinado (sitio de medición), W es la carga por unidad de tiempo (8 ms), y V_{res} es la máxima velocidad de partícula en el sitio de medición. Para una explosión totalmente confinada y esférica en un medio infinito y elástico, la teoría indica que $m = 1/3$ y $n = 1$ ó 2 dependiendo de la distancia desde la explosión. Las cargas usadas en la practica son cilíndricas y no esféricas, además el medio no es infinito por que hay una superficie libre que en muchos casos es vertical. Por medio de un análisis dimensional se puede llegar a un valor de $m = 1/2$ para cargas cilíndricas, mientras que el valor de n varia entre 1.4 y 1.8.

Las vibraciones del suelo causadas por una explosión dada varian en frecuencia así como en amplitud con respecto a la distancia (R). Como resultado de una explosión un rango amplio

Figura B.6. Secuenciación típica de mallas.



(a) Secuenciación por filas (b) Secuenciación en escalón

(c) Secuenciación en V (d) Secuenciación en N

de frecuencias se presentan en las vibraciones del suelo, pero algunas frecuencias o rangos de frecuencias se presentan predominantemente. Estas frecuencias dominantes decrecen con la distancia desde la explosión. El rango de frecuencias registrados en vibraciones inducidas por voladuras esta entre 0.5 y 200 Hz. En algunos casos la frecuencia predominate esta asociada con el borde (Figura B.3, B) y la velocidad de onda *P* (C_P), estando definida como

$$f_1 = \frac{C_P}{2B}, \tag{B.3}$$

o el también se puede relacionar con la altura (H) de la cara y la velocidad de ondas *S* (C_S), en cuyo caso será

$$f_2 = \frac{C_S}{4H}; \tag{B.4}$$

estas ecuaciones se derivan de observaciones de vibraciones en el suelo (OCE, 1972; USACE, 1989). Cuando las mediciones se hacen en afloramiento de roca, la frecuencias predominantes usualmente están entre 10 y 100 Hz; cuando las mediciones se realizan sobre un deposito de suelo de mas de 3 metros la frecuencia predominante esta en el rango de 1 a 40 Hz. Un gran número de voladuras secuenciales micro-retardadas incrementan el contenido de bajas frecuencias en las vibraciones.

B.4.1. Reducción de niveles de vibración

B.4.1.1. Reducir la carga por retardo Para reducir el daño debido a vibraciones del suelo, es necesario reducir la relación carga/retardo a un valor en el cual la maxima velocidad

de partícula sea menor al criterio de daño. Para lograr la fragmentación deseada, es necesario tener un factor de fragmentación a un nivel mínimo. El factor de fragmentación esta definido como el peso de explosivo (W_t) entre el volumen total de roca extraída. Dependiendo del tipo de roca, el borde, y el máximo tamaño de fragmentos necesario, el factor de fragmentación adecuado estará en el rango de 0.3 a 0.6 kg/m^3. Para lograr ambos objetivos (factor de fragmentación y nivel de vibraciones) es necesario incrementar el número de barrenos.

B.4.1.2. Intervalos de retardo Existe una relación inversa entre el tiempo de retardo de la voladura y el nivel de vibración que esta genera. El hecho de cambiar el intervalo de retardo de 5 ms a 9 ms implica una reducción de las vibraciones de 2 a 3 veces en su magnitud (Lutton, 1976). Una causa de tal disminución se debe a que si la onda de presión de un barreno viaja desde éste hasta la cara libre de la voladura y de aquí a otro barreno que esta a punto de detonar, entonces el segundo barreno estará mas confinado y por lo tanto el explosivo suministrara una mayor cantidad de energía, la cual se utilizara en fragmentación.

Los intervalos de retardo pueden producer interferencia destructiva, esta previene la superposición de picos de vibración fuera del área de la voladura. La interferencia constructiva dentro del área de voladura y contigua produce un mayor grado de fracturamiento de la roca, efecto buscado en muchas minas y canteras.

B.4.1.3. Reducción del borde Reduciendo el borde se reduce la duración del confinamiento y menos energía es utilizada en vibraciones del terreno, pero, mas energía es convertida a ondas acústicas.

Tabla B.1. Propiedades de los geles explosivos.

Fuerza peso [%]	Fuerza cartucho [%]	Gravedad especifica	Velocidad det. confinada [m/s]	Resistencia Agua	Emanaciones
			Gel Explosivo		
100	90	1.3	7500 - 8000	Excelente	Pobre
			Straight gel		
90	80	1.3	7000	Excelente	Pobre
70	70	1.4	6400	Excelente	Pobre
60	60	1.4	6000	Excelente	Bueno
50	55	1.5	5600	Excelente	Bueno
40	45	1.5	5000	Excelente	Bueno
30	35	1.6	4400	Excelente	Bueno
20	30	1.7	3300	Excelente	Bueno
			Gel amoniacal		
80	72	1.3	6000	Excelente	Bueno
70	67	1.4	5800	Excelente	Muy Bueno
60	30	1.4	5300	Excelente	Muy Bueno
50	52	1.5	5000	Excelente	Muy Bueno
40	45	1.5	4800	Excelente	Muy Bueno
30	35	1.6	4200	Excelente	Muy Bueno
			Semigeles		
63	60	1.3	3600	Muy bueno	Muy Bueno
63	50	1.2	3600	Muy bueno	Muy Bueno
63	40	1.1	3500	Bueno	Muy Bueno
63	30	0.9	3200	Aceptable	Muy Bueno

Adaptado de OCE (1972)

Tabla B.2. Velocidad de detonación y concentración de carga de ANFO *con relación al diámetro del barreno*

Diámetro barreno [cm]	Velocidad det. confinada [m/s]	Concentración carga en barreno [kg/m]
3,8	2100 – 2700	0.9 – 1.0
5,1	2600 –3000	1.6 –1.9
7,6	3000 – 3300	3.7 – 4.5
10,2	3400 – 3600	6.6 – 7.7
12,7	3500 – 3800	10.3 – 12.2
15,2	3700 – 3900	14.7 – 17.4
17,8	3800 – 4000	19.8 – 23.5
20,3	3800 – 4100	26.2 – 31.0
22,9	3900 – 4100	32.8 – 39.9
25,4	4000 – 4100	40.5 – 48.6
27,9	4000 – 4100	49.2 – 58.7
30,5	4050 – 4100	59.0 – 69.7

Adaptado de OCE (1972)

C. NORMAS INTERNACIONALES

Este anexo tiene como objetivo brindar al lector la traducción de algunas de las normas tratadas en el capitulo 3 (página 19), o referencias a su aplicación de libros especializados, lo que en general se encuentran en idiomas diferentes al español. Adicionalmente se realizó la transcripción de norma española para complementar con una norma en nuestro idioma, las traducidas de otros.

C.1. Norma Suiza SN 640 312 a (1992) para efectos de sacudidas sobre edificaciones

C.1.1. Generalidades

C.1.1.1. Dominio de aplicación Esta norma es aplicable a sacudidas provocadas por

- voladuras,
- máquinas y equipo de construcción de todo tipo,
- tráfico en carretera y ferroviario,

y que pueden incidir sobre edificaciones.

No es aplicable a efectos de sacudidas sobre:

- seres humanos (molestia)
- maquinaria, equipos, instalaciones y sistemas o materiales especialmente delicados que se hallan dentro de las edificaciones
- los suelos (asentamientos, licuación, etc.)

Esta norma no es aplicable para sacudidas con frecuencias inferiores a 8 Hz, como ocurren por ejemplo durante terremotos. Sacudidas por debajo de 8 Hz tienen que ser objeto de análisis particulares.

C.1.1.2. Objeto Esta norma contiene:

- criterios para la evaluación del efecto de sacudidas sobre edificaciones.
- valores indicativos, mediante cuyo acatamiento por lo general se evitan daños en edificaciones.
- recomendaciones para la realización y la interpretación de mediciones de sacudidas.
- recomendaciones para el levantamiento y valoración de fisuramientos.

C.1.1.3. Propósito El acatamiento de los valores indicativos asegura que por lo general se eviten daños en edificaciones como efecto de sacudidas.

Daños en edificaciones también pueden ocurrir por causa de asentamientos y otras deformaciones del suelo de fundación. Estos no pueden ser evaluados mediante mediciones de sacudidas y por lo tanto no son objeto de esta norma.

C.1.1.4. Criterio de valoración La variable determinante para la valoración del potencial de daño de las sacudidas es el valor máximo del vector de velocidad VR (en mm/s), bajo consideración de la frecuencia de vibración (Hz) y la cantidad de las sacudidas.

C.1.1.5. Valoración subjetiva El ser humano puede sentir sacudidas como fuertes o molestas cuando aun son inofensivas para una edificación. Cuando la percepción de ruidos (explosión, golpe de martillo hincador, ruido de tráfico, etc.) es simultánea a la sacudida, la intensidad de la sacudida frecuentemente se sobreestima.

En consecuencia, la valoración subjetiva de los sacudimientos no es una medida confiable para la valoración del efecto de sacudidas sobre las edificaciones.

C.1.1.6. Efecto de sacudidas *Capacidad de vibración de las edificaciones:* Las sacudidas transmitidas a una edificación excitan elementos capaces de vibrar (columnas, pilares, vigas, techos, pisos, paredes, etc.) a vibraciones. Cuando las frecuencias propias (frecuencia fundamental y modos superiores) de elementos con bajo amortiguamiento caen dentro del rango frecuencial de las sacudidas, pueden ocurrir amplitudes de vibración grandes mediante efectos de resonancia. Las frecuencias propias de elementos constructivos están predominantemente entre 10 y 60 Hz. En consecuencia, las edificaciones están más en riesgo si las sacudidas tienen predominio de energías en frecuencias por debajo de 60 Hz, siendo particularmente problemáticas frecuencias por debajo de 30 Hz.

Frecuencia de ocurrencia: La probabilidad de danos aumenta con la cantidad de solicitaciones.

Transmisión de vibraciones por el suelo: Generalmente el suelo actúa de manera amortiguante

en la transmisión de sacudidas a una edificación. Suelos blandos transmiten predominantemente vibraciones de frecuencias bajas; suelos duros también las de frecuencias altas.

La medición de las sacudidas en la edificación incluye el efecto del suelo de fundación sobre las sacudidas.

C.1.2. Valores indicativos

C.1.2.1. Gradación de valores indicativos Los valores indicativos están representados en la tabla C.3 en función de la susceptibilidad de la edificación a sacudidas, de la frecuencia de ocurrencia y la frecuencia determinante de las sacudidas.

Los valores indicativos para edificaciones de susceptibilidad a sacudidas normal (Clase 3) están fijados en la tabla C.3. Para las demás clases de susceptibilidad (1, 2, 4) se da un marco, dentro del cual los valores indicativos se deben fijar bajo consideración de la condición de la edificación.

C.1.2.2. Clases de susceptibilidad de las edificaciones Se distinguen cuatro clases de susceptibilidad:

1. muy poco susceptible,
2. poco susceptible,
3. susceptibilidad normal,
4. particularmente susceptible.

Lo decisivo es la susceptibilidad de los elementos constructivos. Esta es determinada por el tipo de construcción, los materiales utilizados y por las condiciones de la edificación.

Elementos constructivos con repello y revestimiento de yeso, así como elementos secundarios e instalaciones con amarres débiles son mucho más susceptibles a sucudidas que elementos de mampostería y concreto armado sin revestimiento.

Especialmente susceptibles son las zonas de contacto entre materiales de construcción diferentes.

C.1.2.3. Frecuencia de las solicitaciones Las sacudidas se distinguen en 3 clases de frecuencia según la frecuencia de ocurrencia de las solicitaciones por sacudida en una edificación en el período de evaluación:

- ocasionales: la cantidad de solicitaciones es muy inferior a 1000
- frecuentes
- permanentes: cantidad de solicitaciones muy superior a 100000

Como solicitación se considera cada valor máximo del vector de velocidad que supera 0.7 veces el valor indicativo. Como período de evaluación se considera el tiempo durante el cual la edificación es sometida a la sacudida evaluada.

C.1.2.4. Rangos de frecuencia En esta norma se distinguen tres rangos de frecuencias:

- entre 8 y 30 Hz
- entre 30 y 60 Hz
- entre 60 y 150 Hz

La frecuencia determinante se debe medir para la componente de vibración más fuerte, con una precisión de $\pm 10\,\%$.

Tabla C.1: Clases de susceptibilidad

Clase de susceptibilidad	Construcción en altura	Construcción subterránea
1) muy poco susceptible		- puentes en concreto armado o acero - estructuras de contención en concreto armado o mampostería maciza - socavones, túneles, cavernas, pozos en roca dura o sedimentos bien consolidados - cimentaciones de grúas y maquinaria - tuberías sobre terreno

Continua ...

Continuación Tabla C.1 Clases de susceptibilidad

Clase de susceptibilidad	Construcción en altura	Construcción subterránea
2) poco susceptible	- edificaciones industriales y de oficios, en concreto armado o acero, generalmente sin resentimiento - silos, torres, chimeneas altas en construcción maciza y sin revestimiento o estructura de acero - mástiles de estructura metálica. - condición: las edificaciones han sido construidas bajo las reglas generales del ramo y adecuadamente mantenidas	- cavernas, túneles, socavones y tuberías en roca blanda - parqueaderos subterráneos - conducciones industriales (gas, agua, canalización, cables) subterráneas - muros secos
3) susceptibilidad normal	- Viviendas con muros en concreto, concreto armado o ladrillos artificiales - edificios de oficinas, colegios, hospitales e iglesias con muros de mamposteria o ladrillos artificiales y revestimiento en cemento - Condición: las edificaciones han sido construidas bajo las reglas generales del ramo y adecuadamente mantenidas	- captaciones - reservorios - conducciones de hierro gris - cavernas, rasantes y subrasantes en túneles - cables susceptibles

Continua ...

Continuación Tabla C.1 Clases de susceptibilidad

Clase de susceptibilidad	Construcción en altura	Construcción subterránea
4) particularmente susceptible	- casas con cielorasos de yeso o similares ("Hourdis") - construcciones en cerrojo ("Colombage") - edificaciones de la clase 3 nuevas o recientes renovadas - edificaciones históricas o bajo protección	- cables de plomo viejos - tuberías de hierro gris viejas

C.1.2.5. Aplicación de los valores indicativos El valor del vector de velocidad se debe determinar mediante mediciones. Para valores inferiores a los valores indicativos daños pequeños son poco probables. Superación ocasional de los valores indicativos hasta aproximadamente 30 % sólo aumentan la probabilidad de daños mínimamente. Para valores a partir del doble del valor indicativo los daños son probables. Fisuras continuas sólo son esperables para valores que superan varias veces los valores indicativos.

Para circunstancias especiales se debe consultar a un especialista. Este puede fijar valores indicativos mayores o menores en casos justificados.

C.1.3. Realización de las mediciones de sacudidas

C.1.3.1. Principios Debido a que las sacudidas pueden variar fuertemente en las diversas partes de una edificación, las primeras mediciones se deben realizar simultáneamente en varias partes. Un monitoreo permanente posterior se puede limitar a los sitios críticos. Para poder obtener el valor máximo determinante del vector de velocidad, se debe medir en cada sitio en tres componentes ortogonales (perpendiculares entre sí).

C.1.3.2. Sitio de medición y fijación de los sensores Una selección apropiada del sitio de medición, así como un acoplamiento correcto del sensor a la estructura portante de la edificación son condiciones decisivas para la utilidad de los resultados de medición.

Sitio:

Tabla C.2. Frecuencia de las solicitaciones y fuentes de sacudida

Clase de frecuencia de solicitaciones	Cantidad de solicitaciones	Fuentes de sacudidas típicas
Ocasionales	muy inferiores a 1000	- voladuras - compactadores y vibrohincadores, cuando sólo generan vibraciones mayores durante arranque ya pagado
Frecuentes		- voladuras frecuentes - martillos y vibradores para hincado - compactadores - martillos para explotación, operación ocasional - plantas eléctricas de emergencia con operación frecuente
Permanentes	muy superiores a 100000	- tráfico - maquinaria de instalación fija - martillos para explotación

- Como sitios de medición se deberán escoger aquellos elementos rígidos y portantes de la edificación donde se esperan los efectos determinantes de las sacudidas.
- Sin embargo, en losas se deberá medir en zonas de borde.
- Para sacudidas con frecuencias determinantes superiores a 60 Hz los sitios de medición se deberán escoger principalmente en los muros de cimentación.

Fijación:

- Para aceleraciones superiores a 3 m/s^2 los sensores deben ser unidos fijamente a los elementos de la edificación. Para aceleraciones inferiores a 3 m/s^2, es permisible emplazar los sensores sin fijación. Aceleraciones de 3 m/s^2 resultan para las siguientes velocidades y frecuencias (sinusoidales) de vibración:

Tabla C.3. Valores indicativos de vibraciones, para su uso ver Aplicación de los valores indicativos

Clases de susceptibilidad	Frecuencia de solicitaciones	Valores máx. del vector de velocidad resultante (mm/s)		
1) muy poco susceptible	Ocasional Frecuente Permanente	Valores indicativos: hasta el triple de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3)		
2) poco susceptible	Ocasional Frecuente Permanente	Valores indicativos: hasta el doble de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3)		
		Frecuencia dominante		
		<30 Hz	30 - 60 Hz	>60 Hz
3) susceptibilidad normal	Ocasional	15	20	30
	Recurrente	6	8	12
	Permanente	3	4	6
4) particularmente susceptible	Ocasional Frecuente	Valores indicativos: entre los valores indicativos de la clase 3) y la mitad de éstos		

- 25 mm/s a 20 Hz
- 13 mm/s a 40 Hz
- 08 mm/s a 60 Hz

- - Sitios de medición inapropiados son: coberturas laminadas o repellos de paredes, cornisas de ventana sueltas, pisos flotantes, tapetes, etc.

C.1.3.3. Requisitos para el equipo de medición

El equipo de medición (sensores y amplificadores de medición) debe garantizar lo siguiente dentro del rango de 5 - 150 Hz:

- Almacenamiento o graficación de los valores del vector de velocidad de vibración y sus tres componentes en función del tiempo.
- Determinación de la frecuencia dominante.

El buen funcionamiento del equipo de medición debe ser verificado periódicamente. La calibración del equipo debe poder ser objeto de verificación posterior. En casos especiales se debe calibrar todo el sistema de medición en sitio antes y después de cada campaña de medición.

C.1.3.4. Interpretación Los valores indicativos en la tabla C.3 se refieren al monto del valor máximo del vector de velocidad. El valor justo es la combinación crítica del valor máximo del vector de velocidad VR y de la frecuencia en la componente dominante correspondiente al mismo valor.

[la norma incluye aquí un ejemplo de registros y cálculo]

C.1.3.5. Presentación de resultados (protocolos) El protocolo de medidas debe incluir toda la información técnica de las mediciones, en particular la fecha y hora de las mediciones, tipo y ubicación de la fuente de sacudidas, equipo de medición, localización de los puntos de medición, dirección de las componentes, y la descripción de la construcción.

C.1.4. Fisuras y protocolos de fisuras

C.1.4.1. Descripción de fisuras Exceptuando aquellas de materiales metálicos, las edificaciones prácticamente nunca están libres de fisuras. En lo siguiente sólo se consideran aquellas fisuras que desde una distancia de 1 m son visibles a ojo. Esto corresponde a un ancho mínimo de 0.05 mm.

En cuanto a la profundidad de las fisuras se distinguen:

Fisuras superficiales Sólo afectan una parte insignificante del corte del elemento constructivo y sólo disminuyen, si acaso, las calidades estéticas de la edificación, pero generalmente no su aptitud para el uso, durabilidad ni estabilidad.

Fisuras transversales Estas pueden afectar la aptitud de uso de la edificación.

Fisuras pueden ser descritas como sigue:

Fisuras finas 0.2 mm

Fisuras medianas 0.2 – 1 mm

Fisuras anchas 1 – 3 mm

Fisuras abiertas $>=$ 3 mm

C.1.4.2. Desarrollo de fisuras

Durante la construcción: Durante la construcción y durante el tiempo de endurecimiento de los materiales de construcción pueden formarse fisuras (encogimiento, recesión, dilataciones por cambios de temperatura o calor de hidratación, etc.)

Influencias de calor o frío externas (congelamiento) también conducen a que toda edificación durante algún tiempo después de su construcción o de reparaciones presenta fisuras. Su número aumenta con el tiempo.

Generalmente se consideran como admisibles los siguientes anchos de fisura, desde el punto de vista de la estética y la durabilidad:

Tabla C.4. Anchos de fisura admisibles dependiendo de la exposición (Norma Suiza)

Tipo exposición	Ancho [mm]
altos requerimientos estéticos	0.1 mm
sometidos a influencias ambientales	0.2 mm
no sometidos a influencias ambientales	0.3 mm
elementos constructivos interiores	0.4 mm

Envejecimiento: Con el tiempo, las siguientes causas pueden afectar la fisuración en una edificación:

- variaciones de temperatura
- recesos
- transformaciones químicas
- agresiones físicas y biológicas
- abrasión y desgaste
- deformaciones por cargas
- asentamientos del suelo
- modificaciones en la edificación
- etc.

La tasa anual de aumento de fiduras generalmente disminuye con la edad de la edificación, siempre y cuando no se debilita la capacidad de elementos portantes.

C.1.4.3. Aumento de fisuras por sacudidas Las solicitaciones por esfuerzos debidos a sacudidas con valores de velocidad que no superan sensiblemente los valores indicativos apropiados para el objeto son pequeñas. Fisuras pueden formarse en donde ya hay tensiones (incl. tensiones de receso o solicitación estática) tan grandes que la débil tensión dinámica es suficiente para iniciar o aumentar las fisuras. Fisuras que se formaron como consecuencia de sacudidas débiles muy probablemente hubieran aparecido de todas maneras tarde o temprano (después de meses o años). Por tanto, la formación de fisuras iniciadas por sacudidas puede ser considerada parcialmente como una anticipación de fisuramiento ulterior. Esto debe ser tenido en cuenta adecuadamente en la evaluación de daños. Las fisuras que se forman durante sacudidas sólo se distinguen en casos excepcionales de fisuras de tensión usuales; no existen patrones de fisuramiento típicos para sacudidas.

C.1.4.4. Protocolos de fisuras Cantidad, longitud y ancho de fisuras formadas durante un período determinado así como el aumento de fisuras preexistentes (superficiales y transversales) se pueden evaluar mediante un levantamiento cuidadoso antes y después de este período.

Es juicioso realizar los protocolos de fisuras de manera contradictoria. En zonas densamente urbanizadas puede ser razonable prescindir de levantamientos de fisuras si mediante suficientes mediciones las sacudidas son monitoreadas continuamente y los valores de sacudida admisibles se hallan sensiblemente por debajo de aquellos que esta norma asigna a las respectivas clases de edificaciones (tabla C.3).

C.2. Norma sueca SS 460 48 66 (1991), para vibraciones inducidas por voladuras en edificaciones

Esta norma sólo usa la velocidad vertical de vibración, pero prescribe para ciertas situaciones mediciones en las tres componentes. Las vibraciones deben ser medidas siempre, en lo posible, en una posición de la fundación del edificio en la cual las vibraciones son transmitidas a la edificación.

Niveles de guía: Los niveles de guía de esta norma deben ser usados para establecer niveles de vibración permitidos o valores de umbral. Estos valores se fundamentan en una amplia y muy bien documentada correlación entre la componente vertical de la velocidad pico de partícula y daños en edificaciones sobre diferentes tipos de terrenos geológicos. El nivel de guía está dado por:

$$v = v_o F_k F_d F_t \tag{C.1}$$

donde v_o es la velocidad vertical pico sin corrección, F_k un factor de calidad de construcción, F_d el factor de distancia que toma en cuenta la distancia entre la carga y el sitio de medición,

y F_t el factor que describe el tiempo del proyecto de las voladuras[1].

Para la velocidad vertical pico de partícula sin corrección v_o se deben usar los valores de la tabla C.5, Un valor más detallado de v_o se puede obtener si se mide la velocidad de propagación de la onda *P* en el terreno de la edificación en cuestión:

$$v_o = c_p/65 \tag{C.2}$$

donde c_p es en m/s.

Tabla C.5. Valores vertical pico máximos de partícula sin corrección (Norma Sueca)

Tipo de terreno	v_o [mm/s]
Morrena suelta, arena, grava, arcilla	18
Morrena firme, arcillolita, limolita blanda	35
Granito, neis, caliza firme, cuarzita, arenisca, diabasa	70

El factor de calidad de construcción F_k es el producto del factor de construcción F_b y del factor de material F_m:

$$F_k = F_b F_m \tag{C.3}$$

Estos dos factores se han fijado como muestran las tablas C.6 y C.7

Tabla C.6. Valor del factor F_b según el tipo de edificación (Norma Sueca)

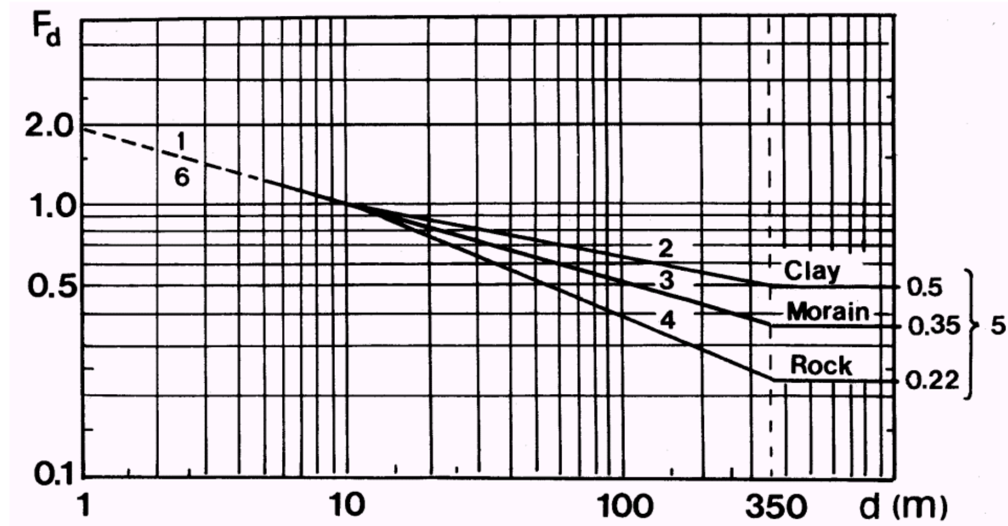
Clase	Tipo de edificación	F_b
1	Edificaciones pesadas (puentes, muelles, defensa civil)	1.70
2	Edificaciones industriales y de oficinas	1.20
3	Viviendas estándar	1.00
4	Edificaciones sensibles de diseño especial (con arcos altos, grandes luces, p. ej. iglesias y museos)	0.65
5	Edificaciones históricas en condición débil y ciertas ruinas	0.50

Tabla C.7. Valor del factor F_m según el tipo de material (Norma Sueca)

Clase	Tipo de material	F_m
1	Concreto reforzado, acero, madera	1.20
2	Concreto no reforzado, ladrillo, clincker	1.00
3	Concreto poroso de autoclave	0.75
4	Ladrillo artificial de caliza ("Mexi-brick")	0.65

El factor de distancia F_d está en función de la distancia más corta entre carga y edificación. Para su determinación, la norma toma en cuenta rangos de distancia (hasta 10 m, 10–350

Figura C.1. relación entre la distancia y el factor F_d



m, más de 350 m) y el tipo de terreno sobre el cual está fundada la edificación (en las tres categorías incluídas en la clasificación de la velocidad no corregida, figura C.1)

El factor de tiempo de proyecto F_t se debe usar en una escala móvil para tiempos de hasta 1 año, y 0.75 para tiempos superiores a 5 años:

Tabla C.8. Valor del factor F_t según el tipo de actividad (Norma Sueca)

Tipo de actividad de voladura	F_t
Obras de construcción (túneles, cavernas, cortes, etc.)	1.00
Trabajos estacionarios (minas, canteras)	0.75 – 1.00

C.3. Norma Escocesa PAN 50: Control de efectos ambientales de trabajos en minería superficial. Anexo D: Control de voladuras en minería superficial

La siguientes secciones son extractos referentes a vibraciones de la Norma PAN 50 en el Anexo D (Scottish Executive, 2000) y relevantes para este proyecto:

[1] por ejemplo, actividades de minería de largo plazo o actividades de construcción de corto plazo)

C.3.1. Vibraciones

12. Cuando un explosivo es detonado en un barreno causa grietas y deformaciones permanentes de la roca a su alrededor. Por fuera del area cercana al sitio de voladura las deformaciones permanentes no se ocurren, en lugar de esto se presenta un rápido decaimiento de las ondas de tension desde la explosión, causando que el suelo muestre propiedades elásticas por medio de las cuales las partículas en la roca regresan a su posición original cuando las ondas pasan. Esto causa que las vibraciones sean radiadas desde el sitio de la voladura y el efecto se reduce al aumentar la distancia.

13. Es siempre el interés del operador el de reducir las vibraciones generadas por voladuras a un mínimo posible tanto en terreno como en el aire, porque esta reducción incrementa sustancialmente la eficiencia de las voladuras, y por lo tanto hay ahorro en las voladuras. A pesar de esto, hasta el mejor diseño y ejecución de una voladura puede generar una cierta cantidad de energía no deseada en forma de ondas transmitidas al suelo que radian desde el sitio de la voladura.

C.3.1.1. Mediciones 14. El BS 7385 parte 1 de 1990, discute el tema de mediciones de vibraciones en términos generales, recomendaciones especificas para investigación de daños se encuentra en la BS 7385 Parte 2 de 1993 y sobre la percepción human en el BS 6472 de 1992.

15. Hay cuatro parámetros interrelacionados que pueden ser usados para de definir la magnitud de vibraciones en el suelo en cualquier lugar, estos son:

Desplazamiento de partícula – la distancia a la que se mueve la partícula antes de retornar a su posición original, medida en milímetros (mm).

Velocidad de partícula – la tasa a la cual cambia el desplazamiento de la partícula, medida en milímetros por segundo (mm/s)

Aceleración de la partícula – la taza de cambio de la velocidad de partícula, medido en milímetros por segundo al cuadrado (mm/s^2) o en términos de la aceleración debida a la gravedad de la tierra (g).

Frecuencia – el número de oscilaciones por segundo al cual una partícula esta sometida, medido en Hertz (Hz).

16. En todas las normas el parámetro preferido de medición es la velocidad de partícula pico (VPP). La medición de los parámetros de partícula al paso de ondas normalmente se realiza en tres direcciones mutuamente perpendiculares, y las partículas oscilaran en estas tres dimensiones:

Longitudinal – También llamada radial, las partículas se mueven hacia adelante y atrás en la misma dirección que viaja la onda vibratoria.

Vertical – Movimiento hacia arriba y abajo perpendicular a la dirección en que la onda esta viajando.

Transversal Movimiento de la partícula a la derecha e izquierda y perpendicular a la dirección en que la onda esta viajando.

C.3.1.2. Niveles de amplificación 17. La mayoría de registros de vibraciones en trabajos de minería superficial son tomados por cualquiera de estos dos casos: para mostrar conformidad con las condiciones impuestas por los organismos de planeación o como respuesta a quejas y demandas. Cuando el registro de vibraciones obedece a quejas por posibilidad de daños en propiedades, una buena practica y aconsejado en el BS 7385 es tomar registros fuera de la propiedad sobre el suelo y muy cerca a la fachada mas cercana del sitio de voladura.

18. Las vibraciones son mas sentidas por las personas dentro de las edificaciones, por consiguiente con el fin de evaluar reclamos es necesario monitorear las vibraciones dentro de la edificación donde hallan sido sentidas, donde los afectados consideren que los efectos son mas apreciables. Adicionalmente, estas mediciones deben ser tomadas junto con otras fuera de la edificación, con el fin de cuantificar cualquier efecto de amplificación. Los niveles de amplificación entre 0.5 a 2.0 son los mas usuales en estructuras de tipo residencial no muy altas. La amplificación puede deberse a varios factores, pero es principalmente debida al que el contenido frecuencial en intervalos de tiempo de las vibraciones es similar a la frecuencia natural de la estructura (o partes de ella).

19. En términos de daños, Los efectos del potencial de amplificación son bien conocidos y aceptados en las normas. Los valores guía son normalmente asociados a registros tomados en la base de la edificación o sobre el suelo contiguo a esta. La BS 7385 comenta que vibraciones máximas pueden ser encontrados a media altura de paredes o pisos pero tales vibraciones usualmente no esta relacionada con la integridad estructural.

C.3.1.3. Efectos de la frecuencia 20. El contenido frecuencial de las vibraciones causadas por voladuras es un factor importante en la determinación de niveles de amplificación y respuesta a las vibraciones tanto en humanos como en estructuras. La frecuencia es en mayor parte determinada por las condiciones geológicas entre la fuente y el receptor, la distancia desde la fuente y en menor proporción por el diseño de la voladura y la geometría del barreno.

21. Entre menos firme o solido sea el medio de transmisión, las altas frecuencias de las vibraciones van a ser reducidas o filtradas sobre distancias cortas. De tal manera, las frecuencias del movimiento del suelo serán relativamente altas cuando se monitorea cerca a la voladura

y/o sea roca solida. Las frecuencias serán relativamente bajas cuando se monitorea a gran distancia de la fuente y/o cuando el medio de transmisión sea relativamente suave, como el caso de arcillas y suelos.

22. Los rangos típicos de frecuencias de vibraciones en el suelo producidos por trabajos en minería superficial es entre 5 y 40 Hz, con niveles predominantes entre 20 y 30 Hz en canteras de extracción de roca y de 5 a 15 Hz en el caso de minas a cielo abierto con menor capacidad de transmisión de ondas al medio. Por lo tanto, la amplificación de vibraciones en una estructura es posiblemente mas probable con voladuras en minería a cielo abierto.

C.3.1.4. Respuesta humana 23. La respuesta humana a vibraciones del suelo inducidas por voladuras son un fenómeno relativamente complejo que depende de una gama de factores de los cuales la amplitud de vibración es únicamente uno y no necesariamente el mas importante. Esta bien identificado que el cuerpo humano es muy sensible a cambios bruscos en el nivel de vibraciones, sin embargo tiene poca capacidad para distinguir magnitudes relativas. Aunque la sensibilidad a las vibraciones varia significativamente entre individuos, una persona generalmente puede ser consiente de vibraciones inducidas por voladuras con una velocidad pico de partícula de alrededor de 1.5 mm/s, y bajo algunas circunstancias a niveles menores a 0.5 mm/s.

24. Una vez las vibraciones sean mayores que el umbral de percepción es posible que se presente preocupación y las personas se queje de las voladuras. Tal preocupación normalmente se relaciona con el potencial de que las vibraciones causen daño a sus propiedades. Esta preocupación pude ser mostrada por daños ya existentes y debidos a recientes descubrimientos de rajaduras que pueden haber estado presentes allí desde hace algún tiempo y que pueden ser causados por procesos naturales. Amenudo, no obstante, la preocupación se basa en el sentimiento de que el daño va a ser causado en algún momento como resultado de repetidas vibraciones.

25. El grado de preocupación y de si se realizan las queja o no, es gobernado por muchos factores. Tal vez el mas obvio es la vibración por si misma en términos de su magnitud, duración y frecuencia. No obstante, la magnitud de vibración a la cual se originan reclamos varia enormemente de un sitio a otro, tal que no existe un umbral determinado en la cual se presentan quejas. Esto es considerado en parte como una reflección en el hecho de que los individuos distinguen muy poco entre vibraciones de diferente magnitud.

26. La Susceptibilidad de los individuos a las vibraciones puede variar de persona a persona, dependiendo de factores tales como: la edad, salud y en gran medida la exposición previa. Generalmente se presenta el caso de que cuando los vecinos se acostumbran a los vibraciones producidas por las voladuras cesan los comentarios adversos. La explicación de la importancia y necesidad de las voladuras y de los niveles de vibraciones que se van a generar por las voladuras generan un actitud comprensiva hacia el operador.

C.3.1.5. Efectos sobre las estructuras 27. Cuando se esta defiendo daños en estructuras de tipo residencial la siguiente clasificación es usada:

Daño cosmético o umbral de daño – Con la formación de grietas finas o el crecimiento de grietas existentes en el estuco, superficie de paredes aligeradas y juntas en mortero.

Daño menor – Con la formación de grietas largas o perdida y caída de superficies tanto de estuco como de paredes aligeradas o grietas en bloques de concreto y ladrillo.

Daño mayor o daño estructural – Daño en elementos estructurales o en la edificación.

28. La BS 7385 de 1993 da una guía de valores respecto a la anterior clasificación de daño en estructuras residenciales en términos de la velocidad pico de partícula y frecuencia. Estos valores son basados en los niveles mas bajos encima de los cuales daño ha sido convincentemente demostrado.

29. Se puede presentar daño cosmético a una frecuencia de 4 Hz con valores de velocidad pico de partícula de 15 mm/s, incrementandose a una velocidad pico de 20 mm/s a los 15 Hz y de 50 mm/s hacia los 40 Hz y frecuencias superiores. Se presenta daño menor con magnitudes de vibración mayores a dos veces las dadas por las de daño cosmético y posiblemente daño mayor en la estructura a niveles mayores a cuatro veces los valores del daño cosmético. Estos valores aplican también cuando un estructura experimenta eventos repetidos de vibraciones.

30. Aunque el miedo al daño es la mayor preocupación de los de las personas que viven cerca a trabajos de minería superficial, la realidad es que los niveles de vibración en las viviendas cercanas, raramente se aproxima a los niveles necesarios para los cuales se producen grietas cosméticas en el estuco. Estructuras como aquellas de las industrias, edificios de comercio grandes o construcciones bajo tierra, son capaces de soportar niveles de vibraciones mayores a los aplicables en las residenciales, en virtud de que estas tienen diseños mas robustos.

31. La BS 7385 parte 1 de 1990 y parte 2 de 1993 discute sobre la resistencia de las estructuras a vibraciones inducidas por voladuras y especifica valores guía a los cuales no se produce daño en varios tipos de estructuras.

C.3.1.6. Predicción 32. La variación en en el peso de carga de explosivos detonada en un instante de tiempo esta relacionado estrechamente a la variación en la magnitud de vibración. Este parámetro junto con la distancia desde la voladuras forman la base para la predicción niveles de vibración.

33. El método aceptado de predicción es el de gráficar el valor de velocidad pico de partícula contra la distancia escalada de las mediciones. La distancia escalada es el valor de la distancia

entre la voladura y el sensor dividido por la raíz cuadrada de la máxima carga instantánea de explosivos detonada para la cual se realizo la medición.

34. Cuando un buen número de valores de VPP y distancia escalada de un sitio son graficados en escala logarítmica se observa la existencia de una relación lineal. Tomando registros de vibraciones a separaciones mayores desde una voladura garantiza que los efectos geológicos sean cubiertos y si luego una cantidad de voladuras se monitorean en un solo sitio, la variación entre este y el lugar de las voladuras puede ser cuantificada.

35. La transmisión de vibraciones no puede nunca ser la misma en todas las direcciones desde el sitio de voladura, para cuantificar estas diferencias es necesario registros de vibraciones en diferentes direcciones.

C.3.1.7. Efectos de la geología 36. Una vez que las vibraciones son generadas en la fuente, es la geología la que determina en gran parte la manera en la cual se transmitirá las vibraciones, y por lo tanto las características predominates de las vibraciones, incluyendo su magnitud a cualquier distancia dada. Un factor importante al respecto, es que la velocidad de propagación es una medida indirecta de las características geológicas, las que afectan la rata de decaimiento de las vibraciones. Las variaciones en las velocidades de propagación en un tipo de roca, e inclusive entre tipos de roca, pueden ser significativos, por lo tanto es importante realizar mediciones de vibraciones especificas para cada sitio.

> *[Aquí la norma incluye una discusión sobre el ruido, polvo, eyecciones de rocas y presión acústica.]*

C.3.2. Condiciones

C.3.2.1. Niveles de vibración permitidos 80. Los niveles de vibración permitidos deben ser especificados en términos de velocidad pico de partícula y deben ser medidos en milímetros sobre segundo. La instrumentación utilizada debe tener 3 sensores en direcciones mutuamente perpendiculares. Debe ser registrado con el fin de demostrar el cumplimiento con la BS 6472, que trata sobre la percepción humana de las voladuras, registros adicionales pueden ser necesarios dentro de la edificación en el lugar donde los ocupantes se sientan incómodos con las vibraciones. (ver paragrafo 97, en la pág 134)

81. En la determinación del nivel preciso de la velocidad pico de partícula se debe reconocer que la imperceptibilidad no es un criterio realista, el limite debería ser siempre escogido para minimizar las vibraciones admisibles por el terreno, esto acorde con la buena practica, seguridad y eficiencia en voladuras. como tal, circunstancias individuales para un sitio en particular deben ser consideradas. Los valores especificados deben ser compatibles con las guías actuales en esta materia dada en las publicaciones relevantes de la British Standards,

particularmente la BS 6472 de 1992 sobre la percepción y la BS 7385 parte 2 de 1993 respecto a la probabilidad de daño.

82. Para determinar el período de tiempo especifico en que se realizan mediciones es necesario considerar con anticipación la frecuencia con que se realizaran las voladuras, esto con el fin de que un número representativo de voladuras pueda ser valorado. También es necesario considera que el período de tiempo sea representativo de cualquier variación del sitio en la ubicación de los explosiones y/o el diseño que se utiliza.

83. Con el fin de ser capaz de evaluar el cumplimiento con el estándar de la probabilidad del 95 %, el numero de voladuras consideradas debe idealmente ser 100 o mas, sin embargo, en la practica puede ser irracional extender el periodo de tiempo de observación a mas de 12 meses antes de que valoración pueda ser emprendida, aun si el número de eventos es realmente pequeño. *[aquí va una pequeña discusión sobre frentes en minas de carbon]*. Un periodo de tiempo mínimo de 3 meses puede ser considerado suficientemente representativo de las variaciones de las voladoras en voladuras de minas a cielo abierto y canteras.

84. Los valores escogidos deben identificar el hecho de que las voladuras en la practica tienen que ser diseñadas de tal manera que el intervalo de confianza del 95 % raramente sea excedido o aproximado. Por consiguiente las voladuras deben ser diseñadas para que los valores medios o promedios de vibraciones estén alrededor de la mitad del 95 % del nivel de confianza. En la practica, se desea que los valores generados sean mas bajos que este valor promedio.

85. Una vez el umbral de percepción es excedido, la probabilidad de quejas es en mayor parte independiente de la magnitud de las vibraciones, pero es en gran medida influenciada por las relaciones entre el operador y la comunidad.

86. Generalmente, las voladuras individuales no debe exceder los 12 mm/s. El nivel promedio no debe exceder los 10 mm/s, y comúnmente no deben estar debajo de 6 mm/s en el 95 % de todas las voladuras registradas. Estos niveles están conforme con la BS 6472 de 1992 y la BS 7385 de 1993 parte 2.

87. Bajo circunstancias excepcionales puede ser apropiado que los niveles estén fuera del rango de 6 a 10 mm/s, tales circunstancias deben ser cuidadosamente examinas por que niveles mayores a estos pueden incrementar la probabilidad de daño en propiedades; niveles menores al rango recomendado pueden en la practica resultar en un mayor número de voladuras para producir el mismo cantidad de extracción, lo cual puede ser contraproducente ambientalmente.

88. Niveles menores deben ser considerados en aproximaciones a hospitales y laboratorios de precisión y donde se realicen trabajos delicados o se operen equipos muy sensibles y deban coincidir con las voladuras. En la determinación de los niveles de vibración permitidos se

deben considerar detalladamente cualquier potencial de restricción de las voladuras. Una justificación completamente racional debe ser dada a las autoridades de planeación cuando se inflijan los niveles de vibración recomendados.

89. *Historic Scotland* debe ser consultada cuando se consideren voladuras de minería superficial que puedan afectar a edificaciones listadas como "Categoría A", o este ubicada en un sitio que este programado o se encuentre en construcción un monumento. Es necesario que los niveles de vibración por voladuras en estructuras históricas estén por debajo de el rango recomendado. Esto puede incluir un meticuloso levantamiento de todos las edificaciones, recogiendo anchos largo y profundidad de todos los defectos antes del comienzo de las voladuras y un monitoreo continuo de estos defectos durante las operaciones de voladuras, hasta el momento en que el monitoreo indique que no ha ocurrido daño debido a las voladuras.

C.3.2.2. Limitación en el número de voladuras 91. Permisos ocasionales incluyen limitaciones en el número de voladuras permitidas en un día o semana, variando típicamente de una a dos voladuras por día a una o dos voladuras por semana. Con la adopción adecuada de criterios de vibración específicos para el sitio tales condiciones son innecesarias.

C.3.2.3. Edificaciones susceptibles a vibraciones 92. Las autoridades encargadas de planeación y los operadores de las minas deben considerar los efectos en las edificaciones susceptibles a vibraciones. Un edificación susceptible es cualquiera ocupada por una o varias personas regular o irregularmente como aposento, lugar de trabajo, sitio de reunion, etcetera (por ejemplo, propiedad residencial, colegios, oficinas, locales comerciales, iglesias, salones comunitarios). Tal ocupación no necesariamente ocurre al mismo tiempo que la voladura.

[Aquí la norma incluye un esquema de control de presión acústica]

C.3.2.4. Esquema de monitores de vibraciones 97. Los requerimientos precisos de cualquier esquema de monitoreo de vibraciones inducidas por voladuras debe ser materia de discusión entre la autoridad planificadora y el operador. Los requerimientos van a ser dependientes del sitio y pueden tomar en cuenta las condiciones locales. Cualquier esquema de medición debe considerar:

- *La localización y el numero de puntos de monitoreo*

  Usualmente la edificación mas susceptible a vibraciones y mas cercana a las sitio de voladura debería ser la localización preferida para el monitoreo. Cuando las voladuras se realizan en mas de un área, entonces es necesario mas de un sitio de monitoreo. Puede ser también apropiado el monitoreo en otros lugares susceptibles a vibraciones aunque no sean los mas cercanos al sitio de voladura.

En algunas circunstancias el acceso a edificaciones sensibles a vibraciones pueden no ser ejecutado (viable), en este caso, se debe considerar seleccionar una localización alejada desde la edificación y en linea con el área de voladuras, en la cual se pueda regularmente monitorear, esta localización debe estar junto en los limites del sitio.

- *El tipo de equipos a usar y los parámetros a ser medidos*

  Las mediciones deben ser realizadas usando monitores especialmente diseñados para el fin de monitoreo de vibraciones por voladuras, tales instrumentos, llamados sismográfos, deben ser capaces de registrar tanto vibraciones del suelo como del aire; las vibraciones del suelo deben ser grabadas en términos de la velocidad de partícula pico con unidades de milímetros por segundo (mm/s) en 3 direcciones mutuamente perpendiculares; las vibraciones aéreas deben ser medidas en decibeles (dB) o en una escala lineal en con unidades de libras por pulgada al cuadrado (p.s.i.).

- *Que tan a menudo las mediciones deben ser tomadas*

  En general todas las voladuras deberían ser monitoreadas para así tener la capacidad de demostrar la conformidad con los límites de vibraciones; en situaciones donde los niveles de vibración medidos sean relativamente bajos comparados con los limites del lugar, puede ser apropiado que únicamente un muestra representativa de voladuras sobre un determinado periodo de tiempo sean monitoreadas, en todos los casos el esquema debe ser precisamente definido lo que es requerido.

- *El método por cuál los datos se hacen disponibles a la autoridad de planeación*

  Los resultados del monitoreo deben estar libremente disponibles para las autoridades de planeación; típicamente los resultados deben conservarse en el sitio y estar disponibles para inspección por las autoridades de planeación a todo momento, y se debe proporcionar copias las autoridades bajo su petición.

- *El método por el cual los datos son usados en orden de asegurar que los limites de vibración en el sitio no han sido excedidos y para mitigar cualquier efecto ambiental de la voladura*

  Procedimientos pueden ser especificados si los valores registrados exceden el nivel acordado. Típicamente estos procedimientos deben involucrar notificación del evento a las autoridades con una valoración de sus implicaciones respecto a actividad futura de voladuras y los limites de vibración del sitio.

C.4. Norma Española UNE 22-381-93

C.4.1. Objeto

El objeto de esta norma es establecer un procedimiento de estudio y control de vibraciones producidas por voladuras con explosivos, y transmitidas por el terreno.

C.4.2. Campo de aplicación

El campo de aplicación se establece para aquellos casos de voladuras especiales en que se requiera la realización de un estudio de vibraciones.

Según el tipo de actividad, la presente norma es de aplicación a los trabajos con explosivos que se puedan clasificar en:

- Trabajos de explotación en minas y canteras, tanto en labores de extracción de materiales como en labores complementarias
- Trabajos de construcción en obras públicas
- Trabajos de demolición y especiales, en los que generalmente se emplean pequeñas cargas (demoliciones en general, taqueos, regeneración de pozos, etc.)

En relación a la posibilidad de realizar ensayos previos mediante explosivos con vistas a la obtención de datos para un estudio de vibraciones, hay que tener en cuenta que, en algunos trabajos, se puede alterar significativamente el elemento a volar con las pruebas. Este punto se tendrá en cuenta a la hora de definir el tipo de estudio requerido. Estas circunstancias se presentan sobre todo en los trabajos de demolición y especiales.

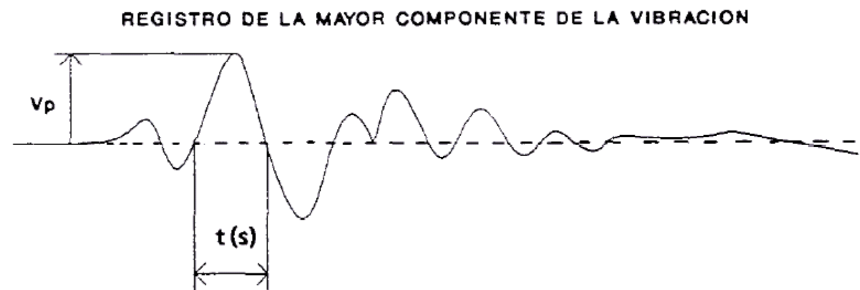
C.4.3. Clasificación de estructuras a efectos de la aplicación del criterio de prevención de daños

Se entiende por estructura colindante toda obra de origen antrópico con una finalidad útil y que sea susceptible de experimentar vibraciones.

Los tipos de estructuras objeto de la presente norma son exclusivamente las clasificables en los siguientes grupos:

Grupo I: Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.

Figura C.2. Determinación de los parámetros característicos de la vibración. V_p es velocidad de vibración pico, la frecuencia principal es $1/2t$



Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa legal vigente. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones.

Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones pro ellas mismas o por elementos que pudieran contener.

NOTA - Para el resto de estructuras el estudio de vibraciones se ajustará a los criterios de la Administración encargada de velar por la seguridad de las personas y las instalaciones, en función del objetivo del proyecto y del tipo de estructuras que previsiblemente puedan estar afectadas.

C.4.4. Determinación de los parámetros característicos de la vibración

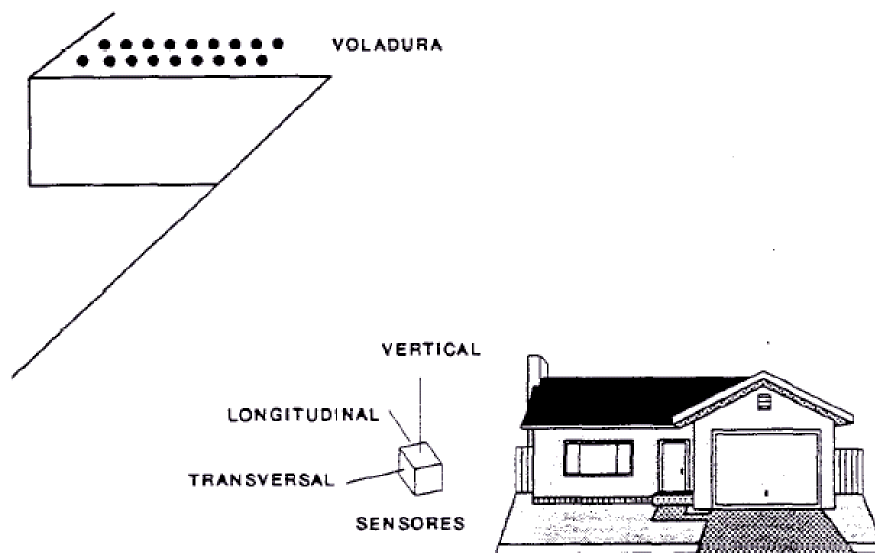
Las vibraciones derivadas de voladuras son oscilaciones transitorias y no periódicas que se propagan por el terreno a una velocidad característica del mismo o velocidad de propagación.

Se define como parámetros característicos de la vibración en esta norma los siguientes:

- Valor pico de la velocidad de vibración en su mayor componente.
- Frecuencia principal de la vibración.

El valor pico de la velocidad de vibración corresponde a la máxima desviación del registro tanto positiva como negativamente sobre el origen (véase figura C.2). si el registro de la vibración fuera en aceleración o desplazamiento tendría que ser integrado o derivado para obtener el registro de velocidad.

Figura C.3. Orientación de los sensores



Dado que la vibración es un movimiento espacial, es necesario realizar, al menos, una medición de las tres componentes en tres direcciones perpendiculares entre sí, que normalmente suelen ser (véase figura C.3):

- Dirección vertical.
- Dirección longitudinal o componente horizontal en dirección a la voladura.
- Dirección transversal o componente horizontal perpendicular a la longitudinal.

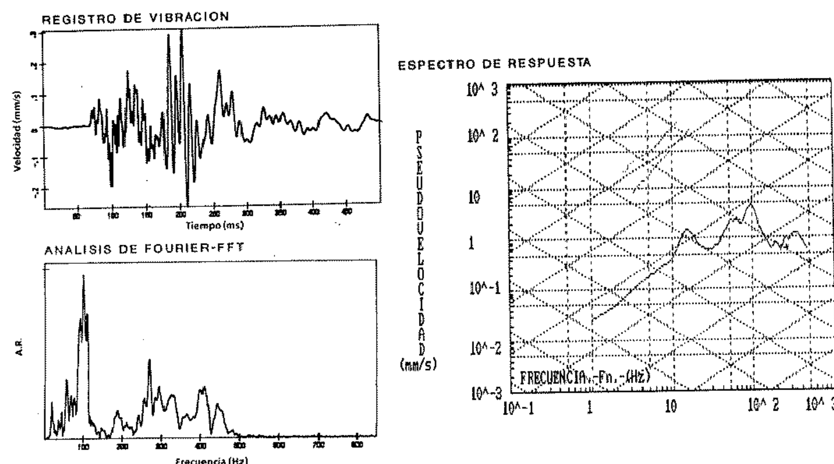
Analizando los tres registros se seleccionará aquella componente que presente un mayor valor pico.

Al ser este tipo de vibraciones no periódicas, participan en ellas diferentes frecuencias, entre las cuales hay que seleccionar una frecuencia principal característica, que varía con el tipo de terreno y con la distancia, siendo tanto más baja cuanto más blando sea el terreno (velocidad sísmica baja) y cuanto más distante esté el punto d registro.

Esta frecuencia principal se puede determinar por diferentes métodos, entre los que se mencionan los siguientes: (véase figura C.4)

- Análisis de Fourier de la señal, cuyo algoritmo aplicado al cálculo por ordenador se conoce como FFT
- Espectro de respuesta de la señal o pseudoespectro de velocidad

Figura C.4. Cálculo de la frecuencia principal



- El método del semiperíodo, que consiste en determinar el tiempo entre el cruce por el origen anterior y posterior al valor pico de la señal. Asignando ese valor al semiperíodo de la frecuencia principal, se puede calcular ésta según las fórmulas siguientes:

$$t(s) = T/2; \quad f(Hz) = 1/T = 1/2t$$

Estos parámetros característicos de la vibración servirán para su comparación con el criterio de prevención de daños.

Puede darse la circunstancia de que un registro presente varios picos de velocidad de vibración del mismo orden y con diferentes frecuencia. En este caso, habría que considerar la menor de las frecuencias. Esta circunstancia queda cubierta si se realiza un análisis de Fourier o de respuesta.

C.4.5. Criterio de prevención de daños

En la figura C.5 y la tabla C.9 se indican los niveles seguros para el valor pico de la mayor componente de la velocidad de vibración medido en el terreno.

El nivel está dado en función del grupo donde quede clasificada la estructura considerad, según la clasificación en la sección C.4.3, y de la frecuencia principal.

Figura C.5. Criterio de prevención de daños

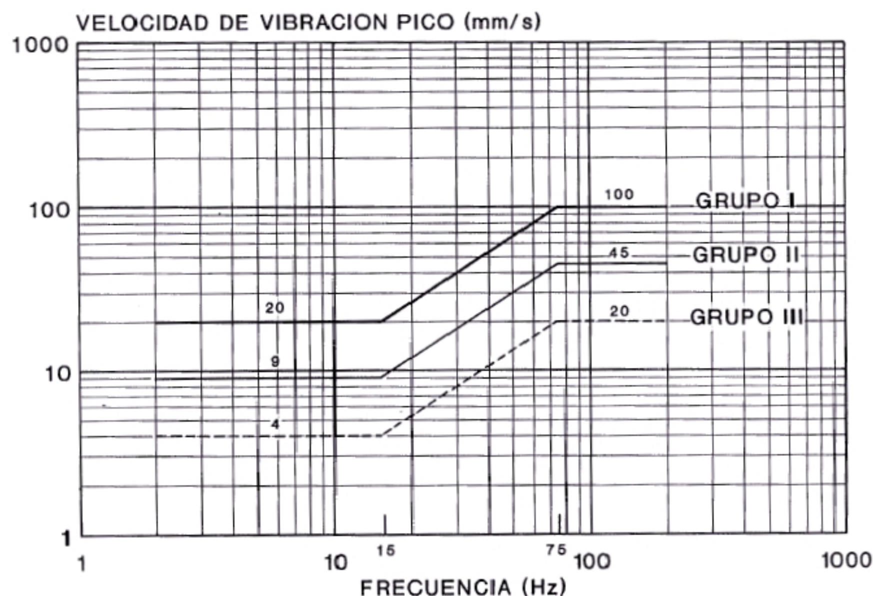


Tabla C.9. Criterios de prevención de daños

		Frecuencia Principal (Hz)		
		2 – 15	15 – 75[a]	> 75
		Velocidad mm/s	Desplazamiento mm	Velocidad mm/s
Tipo de estructura	I	20	0.212	100
	II	9	0.095	45
	III	4	0.042	20

[a] En los tramos de frecuencias comprendidas entre 15 y 75 Hz, en los que el nivel está dado en desplazamiento, se podrá calcular al velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal a través de la ecuación:

$$V = 2\pi f d$$

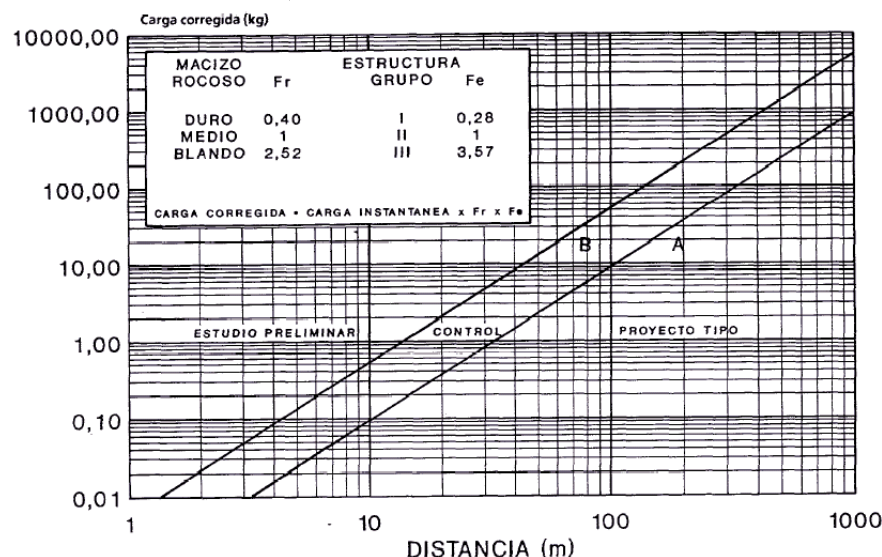
donde:
V es la velocidad de vibración equivalente en mm/s
$\pi = 3.1416$
f es la frecuencia principal en Hz
d es el desplazamiento admisible en mm indicado en la tabla

Excepcionalmente, se podría aprobar niveles superiores a los indicados en casos concretos mediante la presentación de un informe detallado y técnicamente justificado (v.g. análisis de la respuesta en estructuras especialmente diseñadas, acuerdos entre la propiedad de la estructura y la empresa operadora, etc.).

C.4.6. Tipo de estudios de vibraciones requerido

El estudio requerido será función del tipo de trabajo a desarrollar mediante explosivos, de la estructura a preservar, del tipo de terreno, de la distancia existente entre la voladura y

Figura C.6. Tabla carga/distancia general. Selección del tipo de estudio



la estructura y de la carga máxima de explosivo a detonar instantáneamente o carga por secuencia.

En función del tipo de terreno y de la estructura a considerar, queda delimitado el tipo de estudio para unas condiciones de carga por secuencia y distancia determinadas.

Utilizando la figura C.6 se puede conocer el tipo de estudio que podría ser requerido siguiendo el proceso siguiente:

- a) Se determinará el tipo de macizo rocoso sobre el que está cimentada la estructura de acuerdo con la siguiente clasificación, que tiene en cuenta la velocidad sísmica estimada; es decir, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el macizo rocoso considerado:

  Formación rocosa dura: Aquella cuya velocidad sísmica es superior a 4.000 m/s.

  Formación rocosa media: Aquella cuya velocidad sísmica está comprendida entre 2.000 y 4.000 m/s.

  Formación rocosa blanda Aquella cuya velocidad sismica es inferior a 2.000 m/s.

- b) Se determinará el grupo de estructura en función de la clasificación, ya dada en el apartado C.4.3.
- c) Se determinará la distancia entre la voladura y la estructura en metros.
- d) Se determinará la carga máxima instantánea de proyecto en kg que se prevé detonar. Esta carga, también llamada carga por secuencia, es la suma de todas las cargas de

explosivos detonadas con el mismo número de detonador, y para secuencias ente números superiores a 8 ms. Si existen varias secuencias, se considerará la que tenga mayor carga.

En función del grupo de la estructura y del tipo de macizo rocoso se corregirá la carga instantánea multiplicándola por un factor F_e, que considera la estructura a preservar, y un factor F_r, que considera la frecuencia dominate que viene condicionada al tipo de macizo rocoso.

$$Q_c = F_r F_e Q$$

Los valores que toma F_e y F_r se pueden ver en las tablas siguientes:

Tabla C.10. Valores de F_e

Estructura grupo	F_e
I	0.28
II	1
III	3.57

Tabla C.11. Valores de F_r

Estructura grupo	F_r
Duro	0.40
Medio	1
Blando	2.52

Con el valor de Q_c, o carga corregida, y la distancia considerada, se entrará en la figura C.6 definiendo el punto P del caso que se estudia.

Si el punto P está por encima de la recta B, podría ser exigible un estudio preliminar de vibraciones, tal y como se describe en el apartado C.4.7.3.

Si el punto P está entre la curva A y B, se podría requerir una medición de control de la voladura proyectada, tal y como se describe en el apartado C.4.7.2.

Si, por último, el punto está por debajo de la recta A, sólo será necesaria la inclusión en el proyecto de esta justificación con la figura C.6, tal y como se describe en el apartado C.4.7.1.

Para aquellos trabajos en los que la realización de ensayos previos suponga una alteración importante del elemento a volar, el tipo de estudio requerido podrá ser únicamente uno de los siguientes:

- Medición de control.
- Proyecto tipo de vibraciones.

A continuación se dan las expresiones analíticas de las rectas A y B en función del tipo de estructuras y de macizo rocoso para su utilización en lugar de la figura C.6.

$$Q = 924{,}79 \cdot 10^{-6} \frac{1}{F_e} \frac{1}{F_r} F_a D^2$$

donde

Q es la carga máxima instantánea en kilogramos;

D es la distancia en metros.

F_e es el factor de estructura igual a:

0.28	Grupo I
1	Grupo II
3.57	Grupo III

F_r es el factor del macizo rocoso igual a:

2.52	Macizo rocoso blando
1	Macizo rocoso medio
0.40	Macizo rocoso duro

F_a es el factor de la recta

1	recta A
5.77	recta B

C.4.7. Definición de los diferentes tipos de estudio de vibraciones

C.4.7.1. Proyecto tipo de vibraciones Este caso se produce cuando la posición del punto P en la figura C.6 queda por debajo de la recta A, es decir, la carga instantánea de explosivo del proyecto es tan baja para esa distancia que es descartable cualquier incidencia de las vibraciones.

En este caso bastará con adjuntar al proyecto de voladura una hoja con la figura C.6 en la que figure el citado punto, así como una memoria explicativa.

C.4.7.2. Medición de control de vibraciones

Este tipo de estudio puede ser requerido cuando el punto P esté situado entre las rectas A y B.

El control de vibraciones implica la medición del nivel de vibración de una voladura de producción en el punto definido.

Los datos que debe aportar un control de vibraciones son: carga máxima instantánea, carga por cada secuencia y secuencias empleadas, distancia y velocidad de vibración pico para cada componente junto a las frecuencias dominantes, así como la ubicación de los puntos de disparo y registro. También incluirá una breve descripción del terreno.

Si el nivel de vibración resultante del control fuera menor que el nivel fijado por el criterio de prevención de daños, podrá incrementarse progresivamente la carga en controles posteriores, manteniendo igual el resto de los parámetros, hasta que los niveles resultantes sean iguales o inferiores al valor de vibración admisible, calculado según las tablas dadas en la sección C.4.5

Si el nivel de vibración resultante del control superase el nivel fijado por el criterio de prevención de daños, sería necesario un estudio preliminar de vibraciones para voladuras posteriores.

C.4.7.3. Estudio preliminar de vibraciones

Este tipo de estudio podría ser requerido cuando el punto P esté situado por encima de la recta B.

Este tipo de estudio es necesario en circunstancias de trabajo tales que se desee conocer el comportamiento sísmico del terreno, es decir, la relación existente entre la carga detonada, la vibración generada y la distancia. Para ello, será necesaria la realización de ensayos previos.

Las pruebas pasarán por las siguientes fases:

- Determinación de la componente principal con un registro de las tres componentes.
- Medición de la componente principal en posiciones distantes entre sí de manera que cubran el área de interés.
- Medición con diferentes cargas instantáneas en orden creciente hasta llegar, si es posible, a cargas del mismo orden de las que se prevén utilizar controlando los niveles obtenidos in situ.
- Ajuste de los datos de una ley de amortiguación.
- Determinación de la frecuencia dominante en el rango de distancias estudiado.
- Determinación del nivel máximo de vibración obtenido del criterio de prevención de daños en función del tipo de estructura y de la frecuencia dominante.

- Cálculo de las tablas carga instantánea/distancia.

El ajuste de los puntos de ensayo se realizará a las leyes tipo:

- La ley general: $V = KQ^{\alpha}D^{\beta}$
- La ley cuadrática: $V = K(D/\sqrt{Q})^{\beta}$

Las pruebas se han de plantear en base a la detonación de voladuras con diferentes cargas instantáneas, o bien, en base a la ejecución de barrenos individuales confinados con diferentes cargas.

Los ensayos confinados suelen generar niveles de vibración más altos que las voladuras de producción; por tanto, en caso de haber realizado el estudio con cargas confinadas, se podría revisar el estudio con datos posteriores en voladuras de producción.

La realización de controles sucesivos, tal y como se indica en el apartado C.4.7.2, puede aportar datos suficientes para la realización de un estudio preliminar de vibraciones y, por tanto, se convierte en una vía alternativa para la realización de un estudio preliminar. Una vez obtenida la ley que relacione la velocidad de vibración máxima pico con la carga por secuencia detonada y la distancia, se podrá calcular la tabla carga por secuencia/distancia en base al límite de vibración fijado por el criterio de prevención de daños.

C.4.8. Instrumentación a emplear

C.4.8.1. Requerimientos de los equipos Los requerimientos mínimos del sismógrafo adecuado para realizar tanto un control como un estudio preliminar son:

- Capacidad de registrar las tres componentes de la vibración. Si hubiera constatación anterior de la componente principal, se podría utilizar sismógrafos de un solo canal registrando la componente principal.
- Respuesta lineal del equipo en el rango de frecuencias 2 Hz a 200 Hz. Asimismo, si hubiera constatación anterior del rango de frecuencias de la vibración, se podría emplear equipos con un comportamiento linea en este rango.
- Capacidad de detección de niveles pico de vibración desde, al menos, 1 mm/s hasta 100 mm/s.

Los datos técnicos del sismógrafo o sismógrafos empleados en el estudio o control, se incluirán en el informe correspondiente al mismo.

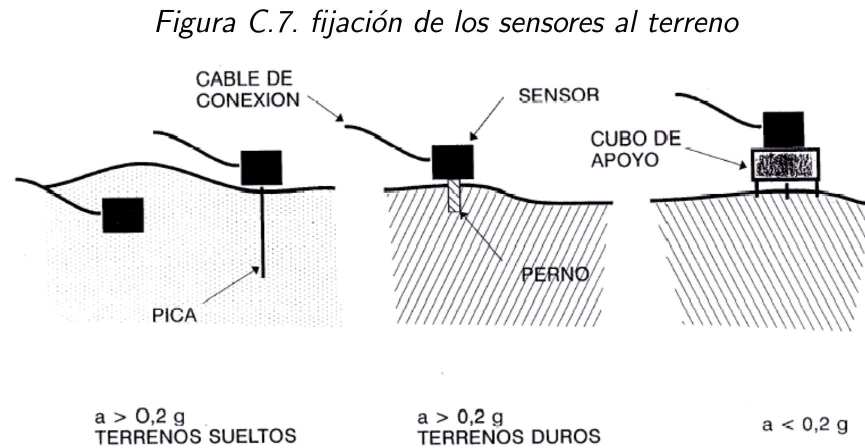
C.4.8.2. Fijación de los sensores al terreno Los sensores utilizados han de ser colocados en el terreno sobre el que está cimentada la estructura, al objeto de determinar la vibración que recibe dicha estructura. Habrá de evitarse la medición en la propia estructura, ya que en ese caso se registraría la respuesta de la misma.

Siempre que se prevea la medición de aceleraciones menores a 0.2 g, se podrá apoyar el sensor, unido a un cubo con una masa suficiente par evitar deslizamientos y con tres patas de apoyo puntuales. Sin embargo, siempre que se prevean aceleraciones mayores a 0.2 g, los sensores se deberán fijar firmemente al terreno con pernos, pegamento u otro sistema.

En terrenos sueltos se podrá clavar el sensor mediante un perno o bien habrá de ser enterrado.

En al figura C.7 se muestran esquemáticamente los sistemas descritos de fijación.

Figura C.7. fijación de los sensores al terreno



D. TRANSFORMADA DE HILBERT

Comúnmente las funciones o señales se definen completamente en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia, y la transformada de Fourier realiza un cambio de la función o señal de un dominio a otro. La transformada de Hilbert conforma la señal con la mitad de la información en el dominio del tiempo y la otra mitad en el dominio de la frecuencia (Huang et al., 1998).

La transformada de Hilbert esta definida como

$$s^*(t) = \frac{1}{\pi}\int \frac{s(\tau)}{t-\tau}d\tau, \tag{D.1}$$

que es equivalente a una rotación de 90°en la fase de cada componente armónica de la señal. Esencialmente esta ecuación define la transformada de Hilbert como la convolución de la función $s(t)$ con $1/t$, por consecuencia enfatiza las propiedades locales de $s(t)$ (Huang et al., 1998).

La transformada de Hilbert puede ser calculada de varias formas, entre ellas:

1. en el caso de tener una función (p.e.: funciones armónicas) se puede aplicar directamente la transformada de Hilbert (ecuación D.1).

2. determinación a partir de $s(t)$ aplicando el operador lineal de convolución (operador normalizado de Hilbert)

   $$h(t) = \frac{2}{\pi}\frac{\sin^2(\pi t/2)}{t}, \;\; t \neq 0 \text{ y } h(t) = 0, \;\; n = 0,$$

   de la forma $s(t) * h(t)$, lo que es equivalente a aplicar un filtro.

3. utilizando la transformada discreta

   $$\mathcal{H}\{s(t)\} = \frac{2}{\pi}\sum_{n=-\infty}^{\infty} s(t - n\Delta t)\frac{\sin^2(\pi n/2)}{n}, \;\; n \neq 0,$$

   (Scheuer y Oldenburg, 1988, entre otros).

4. reduciendo a una representación de fasor si $s(t)$ es un sinusoide, esto es, si $s(t) = A\cos(\omega t + \phi)$ entonces $s^*(t) = A\sin(\omega t + \phi)$ para valores reales de A y ϕ con $\omega > 0$ (Taner et al., 1979),

5. A partir de una transformada de Fourier, pasando al dominio de frecuencias la señal analítica, $\mathcal{F}^+\{\hat{s}(t)\}$ con $\hat{s}(t)$ de la forma $\hat{s}(t) = s(t) + i0$, luego multiplicando por una

función escalón unitario (eliminando la parte negativa de ω en el dominio de las frecuencias) y finalmente haciendo una transformación inversa de Fourier ($\mathcal{F}^{-}\{\hat{S}(\omega)\}$), con lo cual se obtiene $\hat{s}(t) = s(t)+is^{*}(t)$, que es equivalente a $(\delta_t+i\hat{s}(t))\cdot s(t)$ (Claerbout, 1992).

El método utilizado en este proyecto para calcular la transformada de Hilbert es el de la transformada de Fourier (número 5 en la lista anterior), ya que este es rápido.

E. INFORMACIÓN VOLADURAS EN MINA LA CALERA CEMENTOS DEL VALLE

La tabla E.1 de este anexo contiene información suministrada por Cementos del Valle sobre algunos parámetros de diseño de las voladuras. El período de información contenida en esta tabla es de junio de 1999 a agosto de 2002, que corresponde también al periodo de información de registros de vibraciones que aparece en la Tabla F.1 (pág. 159).

La tabla tiene la siguiente estructura:

	Voladura		Localización					
Id.	Fecha	No.	Sect.	Nivel	N	E	MR	CA
id	1	2	3	4	5	6	7	8

A continuación se presenta la descripción detallada de cada uno de los campos de la tabla E.1 relacionados con la numeración que se presento anteriormente:

- id .... Identificador de voladura.
- 1 .... Fecha de la voladura en formato año/mes/día (aaaa/mm/dd-hh-mm).
- 2 .... Código único de la voladura.
- 3 .... Sector donde fue ejecutada la voladura.
- 4 .... Nivel en el que fue ejecutada la voladura.
- 5 y 6 .... Posición de la voladura en coordenadas geográficas.
- 7 .... Material removido (MR) en kg.
- 8 .... Carga de ANFO (CA) en kg.

id es un identificador creado para este trabajo, el cual relaciona información de la Tabla E.1 con los parámetros de las voladuras de la Tabla F.1 (página 159).

La mina ha sido dividida en cinco sectores (en 3), algunos con subdiviciones, según las diferentes caracteristicas como tipo de material encontrado, pendienetes, nivel al que se encuentra, etc.

Tabla E.1: Información de voladuras periodo 1999 → 2002

	Voladura		Localización					
Id.	Fecha	No.	Sect.	Nivel	N	E	MR	CA
1	1999/06/25	V148-99	3	1200	3.6498	-76.4801	6747	1825
2	1999/06/29	V164-99	3	1190	3.6470	-76.4807	9100	1700
3	1999/10/25	V232-99	5B	1040	3.6450	-76.4759	5567	1675
4	1999/10/26	V233-99	5B	1030	3.6444	-76.4757	4046	1200
5	1999/10/29	V236-99	5B	1040	3.6445	-76.4756	4953	1925
6	1999/11/02	V239-99	5B	1030	3.6444	-76.4763	2634	1075
7	1999/11/02	V239-99	5B	1030	3.6444	-76.4763	2634	1075
8	1999/11/03	V230-99	4C	1210	3.6565	-76.4760	4212	1750
9	1999/11/04	V235-99	4A	1100	3.6511	-76.4750	3076	1700
10	1999/11/11	V243-99	3	1190	3.6492	-76.4805	3939	2675
11	1999/11/16	V248-99	5B	1030	3.6449	-76.4760	2509	2250
12	1999/11/17	V244-99	4A	1100	3.6517	-76.4747	5790	2250
13	1999/11/18	V252-99	3	1190	3.6495	-76.4804	6102	1550
14	1999/11/19	V254-99	3	1190	3.6482	-76.4811	6734	1550
15	1999/11/23	V258-99	5B	1040	3.6453	-76.4758	6815	1550
16	1999/11/24	V250-99	4C	1190	3.6559	-76.4750	4212	1725
17	1999/11/25	V253-99	3	1190	3.6487	-76.4808	3892	2300
18	1999/11/26	V256-99	4A	1100	3.6517	-76.4742	3936	1825
19	1999/12/03	V260-99	3	1190	3.6485	-76.4808	2465	1075
20	1999/12/10	V270-99	3	1180	3.6475	-76.4807	4246	1650
21	1999/12/10	V270-99	3	1180	3.6475	-76.4807	4246	1650
22	2000/01/26	V001-00	4A	1100	3.6517	-76.4741	4290	2050
23	2000/01/28	V009-00	3	1190	3.6494	-76.4804	3398	1025
24	2000/02/01	V11-00	3	1180	3.6476	-76.4809	5166	2200
25	2000/02/02	V008-00	3	1180	3.6476	-76.4809	3208	950
26	2000/02/03	V10-00	3	1190	3.6486	-76.4809	4628	1025
27	2000/02/07	V13-00	3	1180	3.6478	-76.4807	3336	2650
28	2000/02/08	V15-00	3	1180	3.6480	-76.4805	5847	2650
29	2000/02/14	V18A-00	3	1190	3.6453	-76.4723	3905	675
30	2000/02/16	V21-00	3	1180	3.6483	-76.4803	4269	2000
31	2000/02/23	V29-00	3	1190	3.6500	-76.4802	2886	1300
32	2000/02/26	V30-00	4A	1170	3.6513	-76.4798	4160	1225
33	2000/03/01	V31-00	5B	1020	3.6437	-76.4763	5374	2150
34	2000/03/07	V34-00	4C	1190	3.6556	-76.4757	5504	1850
35	2000/03/10	V14-00	4C	1190	3.6558	-76.4753	7670	1750
36	2000/03/17	V45-00	3	1180	3.6485	-76.4802	3752	800
37	2000/03/22	V40-00	3	1180	3.6481	-76.4806	4740	1875
38	2000/03/25	V50-00	3	1190	3.6487	-76.4811	2496	1050

Fuente: Cementos del Valle

Continua . . .

Cont. tabla E.1 Infor. voladuras periodo 1999 → 2002

	Voladura			Localización				
Id.	Fecha	No.	Sect.	Nivel	N	E	MR	CA
39	2000/03/27	V52-00	5B	1020	3.6439	-76.4761	5005	1750
40	2000/03/29	V49-00	3	1180	3.6488	-76.4801	3754	1500
41	2000/03/31	V56-00	3	1190	3.6491	-76.4810	2556	1025
42	2000/04/03	V57-00	4A	1170	3.6518	-76.4798	1768	575
43	2000/04/05	V58-00	3	1180	3.6479	-76.4807	5369	2100
44	2000/04/06	V54-00	3	1180	3.6482	-76.4806	4654	1975
45	2000/04/07	V66-00	3	1180	3.6475	-76.4808	3484	1375
46	2000/04/10	V64-00	4A	1170	3.6514	-76.4800	5743	1950
47	2000/04/12	V65-00	3	1180	3.6478	-76.4808	4646	2000
48	2000/04/17	V71-00	3	1180	3.6482	-76.4807	2652	1900
49	2000/04/19	V72-00	3	1180	3.6488	-76.4802	2886	1900
50	2000/04/25	V73-00	3	1180	3.6447	-76.4729	2587	1625
51	2000/04/27	V68-00	3	1170	3.6479	-76.4802	4441	1850
52	2000/05/03	V83-00	4A	1100	3.6517	-76.4749	4212	1500
53	2000/05/04	V85-00	3	1170	3.6472	-76.4798	2491	2075
54	2000/05/05	V88-00	3	1180	3.6476	-76.4807	2496	375
55	2000/05/10	V84-00	3	1180	3.6482	-76.4808	2652	2275
56	2000/05/11	V81-00	3	1180	3.6490	-76.4799	2964	1000
57	2000/05/12	V94-00	3	1170	3.6482	-76.4801	2730	2200
58	2000/05/16	V97-00	3	1180	3.6479	-76.4810	2548	2050
59	2000/05/22	V103-00	5B	1080	3.6490	-76.4761	3367	1400
60	2000/05/31	V114-00	3	1180	3.6484	-76.4806	2730	1625
61	2000/06/02	V122-00	3	1180	3.6478	-76.4807	2548	350
62	2000/06/07	V118-00	3	1180	3.6488	-76.4803	2860	1550
63	2000/06/20	V130-00	3	1180	3.6492	-76.4800	2990	2150
64	2000/06/21	V133-00	3	1180	3.6487	-76.4808	2795	1675
65	2000/06/22	V137-00	3	1170	3.6481	-76.4802	2691	2150
66	2000/06/23	V138-00	3	1180	3.6492	-76.4802	2990	925
67	2000/07/27	V148-00	3	1110	3.6459	-76.4781	2327	1300
68	2000/07/28	V151-00	3	1180	3.6494	-76.4797	3094	1975
69	2000/07/31	V152-00	3	1170	3.6488	-76.4800	3287	2750
70	2000/08/01	V153-00	3	1180	3.6495	-76.4802	3068	1625
71	2000/08/03	V155-00	5B	1080	3.6493	-76.4762	3445	1250
72	2000/08/04	V160-00	3	1180	3.6486	-76.4800	2857	1275
73	2000/08/17	V169-00	3	1180	3.6496	-76.4798	9690	2375
74	2000/08/24	V180-00	3	1170	3.6473	-76.4808	2473	500
75	2000/09/04	V173-00	4C	1190	3.6564	-76.4748	7314	2325
76	2000/09/09	V199-00	3	1090	3.6475	-76.4774	3583	1525

Fuente: Cementos del Valle

Continua . . .

Cont. tabla E.1 Infor. voladuras periodo 1999 → 2002

	Voladura			Localización				
Id.	Fecha	No.	Sect.	Nivel	N	E	MR	CA
77	2000/09/11	V185-00	3	1170	3.6490	-76.4797	10998	2450
78	2000/09/14	V198-00	3	1170	3.6477	-76.4806	6248	1025
79	2000/09/26	V218-00	4A	1090	3.6512	-76.4742	5301	1975
80	2000/09/27	V219-00	3	1170	3.6476	-76.4807	7202	1825
81	2000/09/29	V222-00	3	1170	3.6478	-76.4809	6742	1975
82	2000/10/02	V221-00	3	1170	3.6482	-76.4806	10954	2000
83	2000/10/03	V223-00	5B	1020	3.6446	-76.4761	5265	1550
84	2000/10/03	V223-00	5B	1020	3.6446	-76.4761	5265	1550
85	2000/10/06	V228-00	3	1170	3.6481	-76.4808	4150	1400
86	2000/10/10	V229-00	4A	1170	3.6519	-76.4800	7862	2350
87	2000/10/12	V234-00	4A	1090	3.6514	-76.4739	5236	1675
88	2000/10/17	V230-00	3	1170	3.6498	-76.4795	17758	3700
89	2000/10/18	V232-00	5B	1030	3.6449	-76.4758	7639	2175
90	2000/10/19	V231-00	3	1180	3.6500	-76.4799	11164	1825
91	2000/10/20	V236-00	3	1090	3.6478	-76.4773	6141	1850
92	2000/10/27	V233-00	4C	1190	3.6565	-76.4748	6776	2125
93	2000/11/01	V239-00	3	1170	3.6494	-76.4794	15998	2875
94	2000/11/02	V248-00	3	1170	3.6484	-76.4805	8554	1425
95	2000/11/09	V249-00	5B	1020	3.6450	-76.4758	5538	1825
96	2000/11/16	V261-00	4B	1170	3.6546	-76.4770	6568	1500
97	2000/11/21	V272-00	3	1090	3.6480	-76.4774	3065	875
98	2000/11/23	V271-00	4A	1090	3.6515	-76.4740	2249	550
99	2000/11/24	V275-00	5B	1020	3.6435	-76.4766	6542	1950
100	2000/11/29	V274-00	3	1170	3.6488	-76.4804	6664	1025
101	2000/11/30	V279-00	5B	1020	3.6437	-76.4764	5639	1450
102	2000/12/04	V284-00	5B	1020	3.6437	-76.4764	5616	1275
103	2000/12/14	V283-00	4A	1160	3.6514	-76.4801	3120	1150
104	2000/12/19	V295-00	5B	1020	3.6442	-76.4758	6396	1375
105	2001/02/02	V16-01	5B	1020	3.6447	-76.4758	6978	2300
106	2001/02/06	V17-01	3	1160	3.6471	-76.4810	7254	2025
107	2001/02/07	V19-01	4A	1090	3.6511	-76.4739	6991	1625
108	2001/02/07	V19-01	4A	1090	3.6511	-76.4739	6991	1625
109	2001/02/12	V20-01	5B	1030	3.6455	-76.4755	3250	1000
110	2001/02/13	V18-01	3	1160	3.6472	-76.4805	7371	1000
111	2001/02/16	V21-01	3	1170	3.6493	-76.4803	13390	2425
112	2001/02/21	V31-01	3	1170	3.6498	-76.4800	5853	950
113	2001/02/23	V34-01	3	1170	3.6474	-76.4806	6932	950
114	2001/02/27	V42-01	5B	1020	3.6448	-76.4757	6495	1750

Fuente: Cementos del Valle

Continua ...

Cont. tabla E.1 Infor. voladuras periodo 1999 → 2002

	Voladura			Localización				
Id.	Fecha	No.	Sect.	Nivel	N	E	MR	CA
115	2001/02/28	V33-01	3	1170	3.6477	-76.4803	7836	975
116	2001/03/07	V24-29-01	3	1170	3.6502	-76.4798	31166	6375
117	2001/03/08	V46-01	4A	1090	3.6512	-76.4740	14240	3625
118	2001/03/12	V49-01	5B	1020	3.6455	-76.4751	10096	2650
119	2001/03/13	V45-01	3	1170	3.6480	-76.4803	11835	1900
120	2001/03/21	V58-01	3	1160	3.6472	-76.4806	7423	2700
121	2001/03/22	V53-01	4C	1200	3.6560	-76.4770	6505	2100
122	2001/03/26	V52-01	3	1160	3.6472	-76.4805	13759	2700
123	2001/04/02	V55-01	3	1170	3.6496	-76.4803	18125	3000
124	2001/04/09	V66-01	3	1160	3.6477	-76.4805	11242	3750
125	2001/04/17	V77-01	5B	1020	3.6462	-76.4788	6053	1600
126	2001/04/20	V60-01	3	1160	3.6477	-76.4800	21791	3746
127	2001/04/24	V84-01	5B	1020	3.6450	-76.4757	9461	3375
128	2001/04/25	V75-01	3	1160	3.6477	-76.4802	18340	3525
129	2001/05/04	V85-01	3	1160	3.6477	-76.4801	15296	2175
130	2001/05/23	V95-01	3	1160	3.6484	-76.4798	20439	4175
131	2001/05/25	V107-01	3	1160	3.6479	-76.4808	10070	3575
132	2001/05/30	V102-01	3	1160	3.6483	-76.4802	15140	3100
133	2001/07/06	V122-01	3	1160	3.6483	-76.4801	16908	3300
134	2001/07/06	V122-01	3	1160	3.6483	-76.4801	16908	3300
135	2001/07/10	V105-01	3	1160	3.6494	-76.4792	12659	2275
136	2001/07/10	V105-01	3	1160	3.6494	-76.4792	12659	2275
137	2001/07/11	V141-01	3	1160	3.6485	-76.4811	7353	2025
138	2001/07/11	V141-01	3	1160	3.6485	-76.4811	7353	2025
139	2001/07/13	V140-01	5B	1010	3.6442	-76.4790	4740	1475
140	2001/07/16	V138-01	3	1150	3.6468	-76.4802	8863	1725
141	2001/07/16	V138-01	3	1150	3.6468	-76.4802	8863	1725
142	2001/07/18	V145-01	3	1160	3.6484	-76.4804	6560	1550
143	2001/07/18	V145-01	3	1160	3.6484	-76.4804	6560	1550
144	2001/07/23	V146-01	5B	1010	3.6435	-76.4765	7238	1900
145	2001/07/23	V146-01	5B	1010	3.6435	-76.4765	7238	1900
146	2001/07/24	V143-01	3	1160	3.6483	-76.4801	14274	2550
147	2001/07/24	V143-01	3	1160	3.6483	-76.4801	14274	2550
148	2001/08/01	V151-01	3	1160	3.6487	-76.4808	8268	2125
149	2001/08/02	V156-01	5B	1010	3.6437	-76.4763	8354	2175
150	2001/08/03	V157-01	4A	1130	3.6512	-76.4787	4784	1084
151	2001/08/24	V160-01	3	1160	3.6488	-76.4799	17677	2427
152	2001/08/24	V160-01	3	1160	3.6488	-76.4799	17677	2427

Fuente: Cementos del Valle

Continua ...

Cont. tabla E.1 Infor. voladuras periodo 1999 → 2002

	Voladura			Localización					
Id.	Fecha	No.	Sect.	Nivel	N	E	MR	CA
153	2001/08/28	V168-01	5B	1010	3.6439	-76.4762	9360	2525
154	2001/08/29	V176-01	3	1150	3.6470	-76.4802	25620	4625
155	2001/09/03	V163-01	3	1160	3.6486	-76.4802	9568	1675
156	2001/09/03	V163-01	3	1160	3.6486	-76.4802	9568	1675
157	2001/09/04	V180-01	3	1160	3.6487	-76.4807	2579	950
158	2001/09/05	V177-01	3	1160	3.6494	-76.4798	21710	3950
159	2001/09/05	V177-01	3	1160	3.6494	-76.4798	21710	3950
160	2001/09/06	V182-01	5B	1010	3.6442	-76.4763	5611	1575
161	2001/09/07	V121-01	4A	1110	3.6518	-76.4757	4191	850
162	2001/09/07	V121-01	4A	1110	3.6518	-76.4757	4191	850
163	2001/09/10	V183/186-01	3	1160	3.6487	-76.4804	11495	2500
164	2001/09/10	V183/186-01	3	1160	3.6487	-76.4804	11495	2500
165	2001/09/12	V185-01	5B	1010	3.6442	-76.4762	9398	3325
166	2001/09/12	V185-01	5B	1010	3.6442	-76.4762	9398	3325
167	2001/09/13	V174-01	3	1160	3.6494	-76.4795	20145	3450
168	2001/09/17	V187-01	3	1140	3.6467	-76.4806	13595	2425
169	2001/09/17	V187-01	3	1140	3.6467	-76.4806	13595	2425
170	2001/09/18	V188-01	3	1160	3.6488	-76.4803	7519	2625
171	2001/09/18	V188-01	3	1160	3.6488	-76.4803	7519	2625
172	2001/09/20	V184-01	3	1160	3.6494	-76.4797	24076	4500
173	2001/09/21	V189-01	5B	1010	3.6443	-76.4762	9261	3625
174	2001/09/26	V181-01	3	1150	3.6473	-76.4806	14609	2825
175	2001/09/27	V192-01	3	1160	3.6458	-76.4726	7787	2550
176	2001/10/02	V133-01	4C	1200	3.6565	-76.4767	4901	4100
177	2001/10/04	V194-01	5B	1010	3.6442	-76.4757	5913	2500
178	2001/10/04	V194-01	5B	1010	3.6442	-76.4757	5913	2500
179	2001/10/05	V199-01	4A	1150	3.6529	-76.4771	5565	1625
180	2001/10/08	V203-01	4A	1140	3.6527	-76.4767	4115	1275
181	2001/10/11	V193-01	3	1160	3.6496	-76.4798	20548	3400
182	2001/10/12	V202-01	5B	1010	3.6444	-76.4760	11020	4325
183	2001/10/12	V202-01	5B	1010	3.6444	-76.4760	11020	4325
184	2001/10/16	V206-01	3	1170	3.6502	-76.4802	3775	975
185	2001/10/17	V198-01	3	1160	3.6495	-76.4798	15680	1300
186	2001/10/18	V195-01	3	1140	3.6467	-76.4799	10498	1850
187	2001/10/18	V195-01	3	1140	3.6467	-76.4799	10498	1850
188	2001/10/24	V205-01	3	1160	3.6491	-76.4805	4488	1325
189	2001/10/25	V209-01	3	1160	3.6496	-76.4798	13083	2525
190	2001/10/29	V207-01	3	1160	3.6492	-76.4802	14275	1725

Fuente: Cementos del Valle

Continua ...

Cont. tabla E.1 Infor. voladuras periodo 1999 → 2002

	Voladura			Localización				
Id.	Fecha	No.	Sect.	Nivel	N	E	MR	CA
191	2001/10/30	V216-01	3	1160	3.6493	-76.4804	7575	2500
192	2001/10/31	V208-01	5B	1010	3.6443	-76.4756	10588	3575
193	2001/10/31	V208-01	5B	1010	3.6443	-76.4756	10588	3575
194	2001/11/02	V213-01	4A	1140	3.6527	-76.4771	4750	1075
195	2001/11/06	V83-01	3	1160	3.6496	-76.4792	28330	5150
196	2001/11/06	V83-01	3	1160	3.6496	-76.4792	28330	5150
197	2001/11/07	V200-01	4C	1200	3.6563	-76.4765	3868	1075
198	2001/11/08	V212-01	4A	1150	3.6528	-76.4776	7048	2225
199	2001/11/09	V220-01	3	1150	3.6452	-76.4739	18623	3350
200	2001/11/09	V220-01	3	1150	3.6452	-76.4739	18623	3350
201	2001/11/15	V222-01	4A	1150	3.6530	-76.4771	2245	700
202	2001/11/16	V211-01	3	1150	3.6473	-76.4800	12135	2225
203	2001/11/16	V211-01	3	1150	3.6473	-76.4800	12135	2225
204	2001/11/20	V217-01	3	1160	3.6461	-76.4722	5433	1825
205	2001/11/21	V218-01	5B	1010	3.6458	-76.4792	7535	2650
206	2001/11/21	V218-01	5B	1010	3.6458	-76.4792	7535	2650
207	2001/11/27	V112-01	4B	1180	3.6549	-76.4770	2834	775
208	2001/11/28	V229-01	5B	1010	3.6445	-76.4760	5860	1700
209	2001/11/30	V215-01	3	1160	3.6500	-76.4797	19073	3550
210	2001/11/30	V215-01	3	1160	3.6500	-76.4797	19073	3550
211	2002/02/01	V224-01	3	1150	3.6485	-76.4797	16450	3125
212	2002/02/01	V224-01	3	1150	3.6485	-76.4797	16450	3125
213	2002/02/05	V006-02	5B	1010	3.6446	-76.4754	6973	2025
214	2002/02/05	V006-02	5B	1010	3.6446	-76.4754	6973	2025
215	2002/02/06	V004-02	3	1150	3.6477	-76.4800	15893	3000
216	2002/02/11	V012-02	5B	1010	3.6450	-76.4755	6078	1600
217	2002/02/12	V003-02	3	1160	3.6497	-76.4801	18025	3525
218	2002/02/15	V016-02	3	1160	3.6497	-76.4803	5070	1350
219	2002/02/18	V008-02	3	1140	3.6470	-76.4800	14150	2575
220	2002/02/18	V008-02	3	1140	3.6470	-76.4800	14150	2575
221	2002/02/21	V017-02	5B	1010	3.6449	-76.4754	5393	1450
222	2002/02/21	V017-02	5B	1010	3.6449	-76.4754	5393	1450
223	2002/03/05	V030-02	5B	1010	3.6452	-76.4756	6908	1900
224	2002/03/05	V030-02	5B	1010	3.6452	-76.4756	6908	1900
225	2002/03/07	V018-02	3	1150	3.6492	-76.4790	6538	1250
226	2002/03/07	V018-02	3	1150	3.6492	-76.4790	6538	1250
227	2002/03/12	V028-02	4B	1180	3.6546	-76.4766	3025	875
228	2002/03/18	V029-02	3	1140	3.6471	-76.4801	11633	1800

Fuente: Cementos del Valle

Continua . . .

Cont. tabla E.1 Infor. voladuras periodo 1999 → 2002

	Voladura			Localización				
Id.	Fecha	No.	Sect.	Nivel	N	E	MR	CA
229	2002/03/18	V029-02	3	1140	3.6471	-76.4801	11633	1800
230	2002/03/22	V041-02	3	1150	3.6480	-76.4801	15098	2825
231	2002/03/22	V041-02	3	1150	3.6480	-76.4801	15098	2825
232	2002/03/27	V040-02	3	1150	3.6475	-76.4806	20630	3925
233	2002/03/27	V040-02	3	1150	3.6475	-76.4806	20630	3925
234	2002/04/01	V035-02	5B	1010	3.6449	-76.4753	4523	1225
235	2002/04/01	V035-02	5B	1010	3.6449	-76.4753	4523	1225
236	2002/04/03	V043-02	3	1160	3.6501	-76.4799	7455	1400
237	2002/05/27	V091-02	5B	1010	3.6454	-76.4753	8510	2125
238	2002/06/14	V103-02	3	1150	3.6493	-76.4793	10485	1775
239	2002/06/14	V103-02	3	1150	3.6493	-76.4793	10485	1775
240	2002/06/19	V110-02	3	1140	3.6484	-76.4795	13583	2275
241	2002/06/19	V110-02	3	1140	3.6484	-76.4795	13583	2275
242	2002/07/04	V104-02	3	1140	3.6481	-76.4797	14475	2200
243	2002/07/08	V115-02	4C	1200	3.6568	-76.4746	3488	1075
244	2002/07/09	V097-02	3	1150	3.6482	-76.4803	17230	2725
245	2002/07/11	V123-02	3	1140	3.6485	-76.4795	16133	2775
246	2002/07/23	V116-02	4C	1200	3.6567	-76.4744	3305	850
247	2002/07/25	V124-02	3	1140	3.6471	-76.4805	19601	3325
248	2002/07/25	V124-02	3	1140	3.6471	-76.4805	19601	3325
249	2002/07/30	V139-02	4C	1200	3.6568	-76.4748	2218	600
250	2002/08/06	V142-02	3	1150	3.6482	-76.4806	10000	1875
251	2002/08/09	V144-02	4C	1200	3.6568	-76.4745	3053	900
252	2002/08/12	V141-02	3	1150	3.6471	-76.4809	5150	1225
253	2002/08/13	V133-02	3	1140	3.6486	-76.4795	13098	2250
254	2002/08/13	V133-02	3	1140	3.6486	-76.4795	13098	2250
255	2002/08/15	V147-02	3	1150	3.6483	-76.4804	15275	2750
256	2002/08/21	V145-02	3	1150	3.6490	-76.4802	11445	2025
257	2002/08/26	V148-02	3	1140	3.6472	-76.4805	18278	3275
258	2002/08/27	V153-02	4B	1160	3.6537	-76.4772	3300	900
259	2002/08/29	V156-02	3	1150	3.6494	-76.4789	22277	3275
260	2002/08/29	V156-02	3	1150	3.6494	-76.4789	22277	3275

F. RESULTADOS PROCESAMIENTO DE SEÑALES

La tabla de este anexo (F.1) resulta del análisis de las señales utilizando varios métodos. Para el calculo de la frecuencia instantánea, se utilizó el método explicado en la sección 4.5 (página 49), frecuencia hallada por el método de la bisección, donde la frecuencia se halla a partir del semiperiodo de la señal en el intervalo de mayor velocidad, y frecuencia por medio del espectro de Fourier.

La tabla tiene la siguiente estructura:

Fecha-Hora	Comp.			Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz]				
						I			B	F
1	2	X	3	6	7	8	±	9	14	17
		Y	4			10	±	11	15	18
id		Z	5			12	±	13	16	19

La primera columna contiene información de fecha y hora del sistema en el momento de grabar la señal, también aparece entre paréntesis un numero o un guión (—), el número relaciona esta tabla con la etiqueta id de la Tabla E.1 (página 150), el guión implica que no hay relación entre las dos tablas.

La segunda columna –Comp.–, subdividida en dos, tiene como primer campo el equipo en que se grabo, y en el siguiente campo X, Y o Z, que corresponde a la componente cuyos valores de velocidades y frecuencias se muestran en la fila correspondiente. De estas componentes, la Z nunca ha variado, siempre ha sido la componente vertical, mientras que las componentes X e Y han variado, siendo para unos periodos Norte y Este y para otros Radial y Tangencial.

La columna de frecuencias esta a su vez subdividida en cuatro, las dos primeras, con cabecera I, corresponden a la frecuencia y ancho de banda instantáneos, la tercera columna en las frecuencias, con cabecera B, corresponde a la frecuencia calculada con bisección y la cuarta columna, marcada con F, es la calculada a partir de análisis de Fourier.

A continuación se presenta la descripción detallada de cada uno de los campos de la tabla F.1 relacionados con la numeración que se presento anteriormente:

1	Fecha en formato año/mes/día-hora:minuto (aaaa/mm/dd-hh-mm).
2	Equipo de adquisición –GSR o GCR–
3, 4 y 5	Velocidades máximas en X, Y y Z respectivamente.
6	Velocidad máxima resultante en componentes X, Y y Z (calculada con $R(t) = \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2 + Z(t)^2}$).
7	Velocidad máxima resultante en las componentes horizontales: X e Y (calculada con $R(t) = \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2}$).
8 y 9 .... 10 y 11 .... 12 y 13	Frecuencia y ancho de banda instantáneos en componentes X, Y y Z respectivamente.
14, 15 y 16	Frecuencias calculadas por el método de la bisección en las componentes X, Y y Z respectivamente.
17, 18 y 19	Frecuencias calculadas por análisis de Fourier en las componentes X, Y y Z respectivamente.

Tabla F.1: Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
1999/06/24-23:07	GSR	X	0.15			3.9	±	0.3	3.8	3.3
(—)		Y	0.24	0.29	0.28	3.7	±	0.4	3.6	3.2
		Z	0.09			5.4	±	1.3	3.0	3.6
1999/06/24-23:16	GSR	X	0.21			4.8	±	0.3	4.5	3.4
(—)		Y	0.29	0.32	0.32	3.8	±	0.3	3.8	3.3
		Z	0.11			5.2	±	0.1	4.9	3.8
1999/06/25-19:49	GSR	X	0.24			6.4	±	1.5	4.2	3.2
(1)		Y	0.43	0.43	0.43	4.3	±	0.5	4.2	3.1
		Z	0.24			18.5	±	5.7	20.0	5.9
1999/06/28-23:03	GSR	X	0.09			4.7	±	0.3	4.2	3.4
(—)		Y	0.11	0.13	0.12	4.9	±	1.6	4.8	3.3
		Z	0.09			17.1	±	1.3	11.9	5.9
1999/06/28-23:25	GSR	X	0.07			9.5	±	0.3	3.7	3.3
(—)		Y	0.10	0.10	0.10	6.5	±	1.4	3.6	3.2
		Z	0.06			19.5	±	4.7	11.4	9.4
1999/06/29-19:54	GSR	X	0.08			4.9	±	0.6	4.8	3.6
(2)		Y	0.16	0.16	0.16	4.1	±	0.4	4.1	3.3
		Z	0.08			6.8	±	1.3	4.6	4.5
1999/10/25-19:52	GSR	X	0.03			16.8	±	1.2	15.6	3.8
(3)		Y	0.10	0.10	0.10	12.8	±	0.9	12.5	3.9
		Z	0.06			24.9	±	0.0	23.8	7.4
1999/10/26-19:51	GSR	X	0.10			4.9	±	0.3	4.6	3.6
(4)		Y	0.11	0.11	0.11	4.2	±	0.2	3.8	3.5
		Z	0.09			5.2	±	0.7	6.0	3.8
1999/10/27-19:52	GSR	X	0.12			4.4	±	0.3	3.9	3.3
(—)		Y	0.11	0.14	0.13	5.0	±	0.1	4.9	3.5
		Z	0.09			6.2	±	0.4	11.4	6.0
1999/10/28-19:50	GSR	X	0.46			3.4	±	0.1	3.6	3.3
(—)		Y	0.32	0.49	0.49	4.5	±	0.1	4.5	5.7
		Z	0.28			11.0	±	0.2	6.1	3.8
1999/10/29-19:50	GSR	X	0.06			9.8	±	1.1	8.8	3.6
(5)		Y	0.06	0.08	0.07	5.3	±	0.5	4.4	3.9
		Z	0.06			6.8	±	0.1	6.4	7.3
1999/11/02-15:53	GSR	X	0.09			11.4	±	1.2	11.4	3.5
(6)		Y	0.10	0.12	0.12	6.8	±	1.3	6.3	3.7
		Z	0.08			7.1	±	0.1	7.1	8.6
1999/11/02-19:52	GSR	X	0.09			7.7	±	0.1	7.1	3.6
(7)		Y	0.07	0.09	0.09	3.8	±	0.1	3.5	3.5
		Z	0.06			16.9	±	3.2	8.8	8.2
1999/11/03-19:52	GSR	X	0.05			6.2	±	0.2	5.2	3.8
(8)		Y	0.04	0.06	0.06	5.1	±	0.0	4.3	4.8
		Z	0.03			6.8	±	0.7	6.2	6.5
1999/11/04-19:51	GSR	X	0.10			4.3	±	0.3	4.1	3.3
(9)		Y	0.07	0.11	0.11	6.4	±	2.5	3.9	3.6
		Z	0.06			7.4	±	1.7	5.4	5.0
1999/11/05-16:10	GSR	X	0.10			4.1	±	0.0	4.1	3.3
(—)		Y	0.08	0.11	0.11	4.1	±	0.6	4.2	3.7
		Z	0.05			5.3	±	0.9	5.3	3.8

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
1999/11/05-19:54 (—)	GSR	X	0.04		0.06	4.5	±	0.4	4.7	5.2
		Y	0.05	0.06		4.5	±	0.2	4.8	3.9
		Z	0.05			24.7	±	4.4	6.3	6.7
1999/11/08-20:10 (—)	GSR	X	0.21		0.22	5.1	±	0.4	3.0	3.2
		Y	0.14	0.23		7.3	±	2.8	3.3	3.4
		Z	0.09			22.2	±	6.7	21.7	6.8
1999/11/09-16:10 (—)	GSR	X	0.07		0.11	10.3	±	0.3	8.2	3.5
		Y	0.11	0.12		6.1	±	0.1	4.5	5.7
		Z	0.11			26.4	±	3.5	27.8	7.1
1999/11/09-19:56 (—)	GSR	X	0.17		0.17	4.2	±	0.1	3.9	3.3
		Y	0.10	0.17		5.6	±	0.3	3.8	3.4
		Z	0.08			16.4	±	0.8	15.2	3.7
1999/11/10-19:53 (—)	GSR	X	0.10		0.11	7.8	±	0.6	4.3	3.3
		Y	0.07	0.11		8.5	±	2.0	4.8	3.4
		Z	0.08			7.6	±	0.2	5.6	6.9
1999/11/11-19:53 (10)	GSR	X	0.22		0.24	6.6	±	0.3	4.0	3.2
		Y	0.21	0.25		4.9	±	0.0	3.6	3.4
		Z	0.17			7.4	±	0.9	5.7	7.4
1999/11/12-19:51 (—)	GSR	X	0.18		0.19	4.9	±	0.1	4.5	3.3
		Y	0.15	0.21		5.4	±	0.9	3.6	3.4
		Z	0.16			6.3	±	0.3	6.2	6.9
1999/11/12-20:02 (—)	GSR	X	0.11		0.11	4.2	±	1.3	3.6	3.3
		Y	0.09	0.11		4.8	±	0.4	4.6	3.4
		Z	0.07			20.9	±	1.1	27.8	3.7
1999/11/16-19:59 (11)	GSR	X	0.08		0.14	6.8	±	0.1	7.5	6.3
		Y	0.13	0.14		11.1	±	0.0	10.6	3.8
		Z	0.10			7.1	±	0.3	6.8	6.7
1999/11/17-19:51 (12)	GSR	X	0.06		0.07	4.1	±	0.1	4.0	3.6
		Y	0.06	0.07		5.1	±	0.1	4.2	4.5
		Z	0.03			4.8	±	0.3	5.0	4.2
1999/11/18-19:49 (13)	GSR	X	0.19		0.19	6.1	±	1.1	3.6	2.8
		Y	0.14	0.19		4.4	±	0.1	4.5	4.6
		Z	0.14			30.5	±	7.5	29.4	6.5
1999/11/19-19:49 (14)	GSR	X	0.11		0.12	8.9	±	0.1	7.8	4.5
		Y	0.10	0.13		10.7	±	0.3	11.1	4.0
		Z	0.08			10.2	±	1.3	6.2	4.8
1999/11/22-20:05 (—)	GSR	X	0.08		0.08	14.5	±	2.4	6.0	3.3
		Y	0.07	0.08		4.6	±	0.7	4.3	3.6
		Z	0.07			22.9	±	1.4	16.1	4.3
1999/11/23-19:51 (15)	GSR	X	0.05		0.07	3.8	±	0.1	3.9	3.0
		Y	0.07	0.07		5.2	±	1.2	2.7	3.1
		Z	0.04			6.8	±	0.1	5.7	3.3
1999/11/24-19:57 (16)	GSR	X	0.07		0.08	10.0	±	0.3	10.0	3.5
		Y	0.04	0.08		14.8	±	0.1	7.9	3.3
		Z	0.06			20.3	±	4.4	20.8	11.3
1999/11/25-19:50 (17)	GSR	X	0.17		0.19	9.3	±	1.1	9.4	3.3
		Y	0.16	0.19		8.1	±	0.4	7.8	3.5
		Z	0.09			9.3	±	0.2	9.3	3.7

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
1999/11/26-19:57	GSR	X	0.07		0.10	8.5	±	1.2	7.7	3.0
(18)		Y	0.09	0.10		5.2	±	0.2	4.5	4.5
		Z	0.05			12.0	±	0.4	12.2	4.8
1999/11/29-19:50	GSR	X	0.09		0.14	5.7	±	0.9	3.8	4.3
(—)		Y	0.11	0.14		4.0	±	0.5	3.5	3.3
		Z	0.07			19.2	±	2.8	10.4	3.7
1999/11/29-20:02	GSR	X	0.06		0.09	12.0	±	0.9	11.9	11.0
(—)		Y	0.09	0.09		11.2	±	0.8	5.2	3.3
		Z	0.05			27.5	±	2.7	5.2	6.2
1999/11/30-20:01	GSR	X	0.10		0.14	4.7	±	0.6	4.5	4.6
(—)		Y	0.10	0.14		8.1	±	0.0	8.6	6.1
		Z	0.05			18.1	±	5.5	11.6	3.8
1999/12/01-19:50	GSR	X	0.07		0.08	7.0	±	0.2	5.9	5.7
(—)		Y	0.08	0.10		10.8	±	2.0	8.3	3.3
		Z	0.08			28.7	±	5.0	5.3	6.3
1999/12/02-22:50	GSR	X	0.10		0.11	5.1	±	0.5	4.6	3.6
(—)		Y	0.10	0.13		3.9	±	1.2	3.7	3.4
		Z	0.07			7.6	±	0.7	7.1	7.1
1999/12/02-22:54	GSR	X	0.10		0.22	4.9	±	0.7	4.5	4.6
(—)		Y	0.22	0.24		12.1	±	0.0	15.2	3.3
		Z	0.15			11.0	±	1.5	10.9	9.3
1999/12/03-19:56	GSR	X	0.07		0.08	9.4	±	2.3	6.9	5.7
(19)		Y	0.06	0.08		5.9	±	1.3	3.5	6.2
		Z	0.06			6.3	±	0.4	23.8	6.1
1999/12/09-19:49	GSR	X	0.14		0.22	4.0	±	0.0	3.6	3.6
(—)		Y	0.22	0.22		3.9	±	0.4	3.8	3.3
		Z	0.07			4.7	±	0.5	3.3	3.8
1999/12/10-19:53	GSR	X	0.20		0.30	5.5	±	2.1	4.1	4.4
(20)		Y	0.29	0.32		4.5	±	0.2	4.5	3.3
		Z	0.23			5.5	±	0.1	5.7	7.2
1999/12/10-20:01	GSR	X	0.18		0.21	5.8	±	0.4	5.5	5.9
(21)		Y	0.18	0.21		11.9	±	0.9	10.4	6.3
		Z	0.17			7.1	±	0.4	6.6	7.0
2000/01/25-19:58	GSR	X	0.09		0.12	5.3	±	0.6	3.9	3.3
(—)		Y	0.12	0.12		4.1	±	0.3	3.8	3.4
		Z	0.07			6.3	±	0.3	6.2	6.9
2000/01/26-19:55	GSR	X	0.04		0.08	5.5	±	0.3	4.5	3.3
(22)		Y	0.08	0.08		5.3	±	0.8	4.3	3.3
		Z	0.06			6.2	±	0.3	5.5	4.9
2000/01/27-19:46	GSR	X	0.22		0.24	3.7	±	0.1	3.7	3.8
(—)		Y	0.13	0.24		3.5	±	0.2	3.5	3.3
		Z	0.10			6.2	±	1.3	5.0	3.7
2000/01/27-19:54	GSR	X	0.11		0.12	8.7	±	0.1	4.8	3.3
(—)		Y	0.09	0.12		5.7	±	1.2	3.5	3.4
		Z	0.07			8.1	±	0.2	7.6	7.0
2000/01/28-19:50	GSR	X	0.18		0.18	4.2	±	0.2	3.8	3.2
(23)		Y	0.17	0.19		4.5	±	0.4	4.4	3.3
		Z	0.11			5.9	±	0.6	6.0	5.9

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/02/01-19:52	GSR	X	0.11		0.14	9.4	±	1.9	5.2	7.3
(24)		Y	0.14	0.17		7.4	±	0.3	5.7	6.2
		Z	0.11			6.8	±	0.4	6.5	7.0
2000/02/02-19:47	GSR	X	0.08		0.12	7.9	±	0.9	4.0	3.2
(25)		Y	0.10	0.12		4.4	±	0.5	3.7	3.6
		Z	0.06			16.9	±	1.1	12.5	3.8
2000/02/03-19:49	GSR	X	0.12		0.12	4.6	±	0.4	4.1	4.2
(26)		Y	0.11	0.13		4.5	±	0.4	4.1	3.3
		Z	0.07			6.4	±	0.5	4.8	3.8
2000/02/04-19:49	GSR	X	0.05		0.05	4.1	±	0.4	3.7	3.3
(—)		Y	0.04	0.05		4.6	±	0.5	3.3	3.3
		Z	0.03			6.3	±	1.5	5.3	6.8
2000/02/07-19:54	GSR	X	0.15		0.17	5.5	±	1.1	3.6	3.3
(27)		Y	0.14	0.17		4.4	±	0.4	4.1	3.4
		Z	0.07			5.5	±	1.8	5.0	3.8
2000/02/08-19:52	GSR	X	0.11		0.14	5.1	±	1.7	3.9	3.9
(28)		Y	0.13	0.15		6.2	±	0.0	4.5	3.8
		Z	0.08			7.1	±	2.0	7.2	7.4
2000/02/14-19:51	GSR	X	0.11		0.17	6.2	±	0.2	5.6	4.2
(29)		Y	0.17	0.17		5.4	±	0.7	5.8	6.3
		Z	0.12			6.6	±	0.2	6.6	7.1
2000/02/16-19:51	GSR	X	0.14		0.21	8.8	±	0.7	5.5	2.9
(30)		Y	0.21	0.22		5.1	±	0.5	5.7	3.6
		Z	0.09			7.1	±	0.7	7.4	6.0
2000/02/18-19:47	GSR	X	0.10		0.11	7.5	±	0.4	7.2	3.3
(—)		Y	0.07	0.11		4.6	±	0.5	4.0	3.4
		Z	0.07			7.3	±	0.2	10.6	9.3
2000/02/18-19:48	GSR	X	0.09		0.10	3.9	±	0.4	3.6	3.2
(—)		Y	0.09	0.10		3.7	±	0.5	3.6	3.3
		Z	0.08			27.3	±	3.9	27.8	3.7
2000/02/23-22:54	GSR	X	0.09		0.11	12.4	±	0.1	11.6	3.8
(31)		Y	0.10	0.11		12.3	±	1.3	10.4	4.3
		Z	0.05			6.9	±	0.4	6.0	7.0
2000/02/26-16:01	GSR	X	0.11		0.14	3.7	±	0.3	3.2	3.4
(32)		Y	0.09	0.14		4.4	±	0.1	4.0	3.4
		Z	0.05			12.4	±	4.0	12.5	4.6
2000/03/01-19:52	GSR	X	0.06		0.10	11.7	±	1.1	10.6	5.2
(33)		Y	0.08	0.10		12.7	±	2.0	11.9	2.7
		Z	0.06			26.4	±	6.0	14.7	10.8
2000/03/07-19:56	GSR	X	0.05		0.07	4.1	±	0.1	3.8	3.3
(34)		Y	0.06	0.07		4.2	±	0.5	4.1	3.4
		Z	0.04			17.3	±	0.9	16.1	7.3
2000/03/10-19:53	GSR	X	0.09		0.12	3.6	±	0.0	3.7	3.4
(35)		Y	0.09	0.12		3.5	±	0.2	3.8	3.4
		Z	0.05			14.4	±	0.2	13.9	3.7
2000/03/13-22:57	GSR	X	0.06		0.07	10.3	±	2.2	7.4	3.8
(—)		Y	0.06	0.07		5.8	±	0.8	4.5	3.4
		Z	0.07			10.1	±	0.9	8.5	7.6

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/03/14-19:51	GSR	X	0.07		0.09	4.7	±	0.0	4.1	3.3
(—)		Y	0.08	0.09		4.0	±	0.3	4.1	4.5
		Z	0.04			5.3	±	0.6	5.3	4.4
2000/03/14-22:55	GSR	X	0.15		0.16	4.7	±	1.0	5.0	3.3
(—)		Y	0.13	0.16		4.5	±	0.2	4.6	3.4
		Z	0.09			5.6	±	0.1	5.6	6.0
2000/03/17-19:49	GSR	X	0.07		0.09	4.3	±	0.1	3.7	3.3
(36)		Y	0.06	0.09		3.9	±	1.0	3.4	3.3
		Z	0.03			6.3	±	0.4	6.5	3.8
2000/03/21-20:08	GSR	X	0.09		0.09	4.3	±	0.2	3.6	3.4
(—)		Y	0.05	0.09		4.4	±	0.0	3.7	3.4
		Z	0.05			16.5	±	2.2	16.1	6.9
2000/03/22-19:55	GSR	X	0.19		0.22	8.9	±	1.0	6.8	3.3
(37)		Y	0.21	0.23		5.4	±	0.2	4.8	3.4
		Z	0.13			7.8	±	0.2	7.5	7.4
2000/03/24-20:04	GSR	X	0.09		0.11	6.7	±	1.9	7.2	3.4
(—)		Y	0.11	0.12		5.3	±	1.0	4.0	3.7
		Z	0.07			23.8	±	0.4	22.7	9.2
2000/03/24-22:58	GSR	X	0.05		0.06	8.2	±	0.3	7.4	3.4
(—)		Y	0.04	0.06		7.8	±	0.9	12.2	3.3
		Z	0.05			11.0	±	0.9	10.2	7.0
2000/03/25-15:55	GSR	X	0.17		0.23	5.9	±	0.6	5.6	4.2
(38)		Y	0.16	0.24		5.1	±	0.7	4.1	3.7
		Z	0.12			18.2	±	0.6	11.9	3.9
2000/03/27-19:53	GSR	X	0.10		0.17	8.3	±	0.6	6.4	5.1
(39)		Y	0.16	0.18		5.2	±	1.1	4.2	5.7
		Z	0.08			15.1	±	2.1	10.2	4.5
2000/03/29-19:48	GSR	X	0.26		0.39	3.5	±	0.4	3.5	3.3
(40)		Y	0.28	0.39		3.6	±	0.1	3.6	3.4
		Z	0.17			5.9	±	0.4	5.6	7.0
2000/03/30-22:59	GSR	X	0.10		0.14	4.6	±	0.3	4.6	3.3
(—)		Y	0.11	0.14		4.6	±	0.4	4.6	3.4
		Z	0.05			7.1	±	1.9	5.6	6.3
2000/03/31-19:55	GSR	X	0.26		0.32	4.2	±	0.4	4.0	4.2
(41)		Y	0.31	0.32		4.6	±	0.2	4.4	3.3
		Z	0.19			5.7	±	0.2	4.5	3.9
2000/04/03-20:01	GSR	X	0.10		0.10	11.4	±	0.0	10.6	3.4
(42)		Y	0.08	0.14		5.8	±	1.5	11.1	3.3
		Z	0.14			18.6	±	0.8	10.6	7.0
2000/04/05-19:54	GSR	X	0.16		0.16	11.9	±	1.1	9.8	3.3
(43)		Y	0.13	0.16		5.5	±	0.9	4.4	6.2
		Z	0.09			16.4	±	2.6	5.0	6.1
2000/04/06-19:54	GSR	X	0.10		0.11	3.8	±	0.0	3.9	3.4
(44)		Y	0.09	0.11		5.8	±	0.0	5.1	4.6
		Z	0.11			22.6	±	0.0	20.8	3.9
2000/04/07-19:56	GSR	X	0.08		0.08	8.2	±	0.7	7.9	5.4
(45)		Y	0.06	0.09		5.4	±	0.8	4.3	5.1
		Z	0.07			8.0	±	0.8	5.9	6.0

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/04/10-20:08	GSR	X	0.07		0.08	5.0	±	0.3	4.1	3.3
(46)		Y	0.05	0.08		5.1	±	0.1	4.2	3.4
		Z	0.05			15.8	±	2.5	14.3	6.6
2000/04/12-19:53	GSR	X	0.14		0.15	3.8	±	0.5	3.9	3.5
(47)		Y	0.12	0.15		7.3	±	0.2	5.1	3.6
		Z	0.11			16.6	±	2.1	14.7	6.0
2000/04/13-19:58	GSR	X	0.05		0.08	8.4	±	1.0	9.1	3.5
(—)		Y	0.07	0.09		12.7	±	1.5	12.2	3.8
		Z	0.05			17.0	±	3.7	12.5	3.8
2000/04/13-20:10	GSR	X	0.12		0.14	6.5	±	0.0	3.4	3.3
(—)		Y	0.11	0.15		5.4	±	0.7	4.0	3.4
		Z	0.06			8.2	±	0.8	7.8	6.4
2000/04/17-19:58	GSR	X	0.14		0.14	10.9	±	0.5	10.4	5.7
(48)		Y	0.10	0.15		11.9	±	2.2	5.7	6.2
		Z	0.09			9.0	±	1.4	7.6	6.0
2000/04/19-19:59	GSR	X	0.15		0.19	4.4	±	1.2	3.1	3.3
(49)		Y	0.12	0.19		4.4	±	0.6	3.9	3.4
		Z	0.08			5.7	±	0.5	5.7	7.2
2000/04/24-19:54	GSR	X	0.14		0.17	4.6	±	0.1	4.2	3.3
(—)		Y	0.13	0.17		4.4	±	0.2	3.5	3.4
		Z	0.09			5.7	±	0.1	5.6	6.0
2000/04/24-20:03	GSR	X	0.08		0.11	9.5	±	1.5	9.3	9.0
(—)		Y	0.09	0.11		10.3	±	0.2	10.2	8.3
		Z	0.06			7.5	±	0.5	7.5	8.5
2000/04/25-19:52	GSR	X	0.09		0.10	7.8	±	1.7	4.2	5.9
(50)		Y	0.07	0.11		4.7	±	0.1	4.5	3.4
		Z	0.08			15.9	±	2.8	11.4	6.1
2000/04/27-19:51	GSR	X	0.12		0.13	7.6	±	1.8	6.9	3.4
(51)		Y	0.12	0.14		9.1	±	0.3	5.0	3.4
		Z	0.09			9.1	±	0.5	6.3	9.1
2000/05/02-19:52	GSR	X	0.16		0.28	3.2	±	0.1	3.2	3.3
(—)		Y	0.23	0.28		3.6	±	0.3	3.5	3.4
		Z	0.08			8.1	±	0.1	4.3	3.8
2000/05/02-19:59	GSR	X	0.12		0.13	9.8	±	1.6	9.3	3.3
(—)		Y	0.06	0.13		8.4	±	1.4	7.8	3.2
		Z	0.06			8.4	±	0.1	7.9	8.3
2000/05/03-19:52	GSR	X	0.07		0.11	11.2	±	0.1	10.6	3.3
(52)		Y	0.11	0.11		4.1	±	0.1	3.6	3.4
		Z	0.04			9.0	±	0.5	8.5	4.4
2000/05/04-19:55	GSR	X	0.36		0.53	3.3	±	0.0	3.2	3.3
(53)		Y	0.43	0.54		4.1	±	0.2	3.7	3.4
		Z	0.18			10.3	±	1.0	9.1	9.2
2000/05/05-19:49	GSR	X	0.05		0.06	5.2	±	2.1	3.8	3.2
(54)		Y	0.04	0.07		9.6	±	0.6	4.6	3.3
		Z	0.05			8.6	±	2.0	6.8	6.1
2000/05/08-20:07	GSR	X	0.05		0.05	5.7	±	0.2	5.2	2.9
(—)		Y	0.04	0.07		5.5	±	0.9	5.0	3.7
		Z	0.05			6.0	±	0.2	5.6	7.1

Continua . . .

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/05/08-20:17	GSR	X	0.08		0.09	8.9	±	0.4	8.8	9.9
(—)		Y	0.07	0.09		8.4	±	0.7	3.4	4.7
		Z	0.06			8.3	±	0.3	8.2	9.7
2000/05/09-19:55	GSR	X	0.42		0.47	5.6	±	0.2	3.0	3.3
(—)		Y	0.36	0.48		5.2	±	0.2	4.0	3.4
		Z	0.27			5.9	±	0.3	5.4	3.8
2000/05/09-20:00	GSR	X	0.11		0.13	4.1	±	0.5	3.7	3.2
(—)		Y	0.09	0.13		4.8	±	0.6	3.8	3.3
		Z	0.07			6.8	±	0.3	5.8	3.7
2000/05/10-19:53	GSR	X	0.45		0.50	8.1	±	1.9	3.6	3.2
(55)		Y	0.40	0.50		4.0	±	0.0	3.3	3.3
		Z	0.31			17.8	±	0.2	4.6	3.8
2000/05/11-19:55	GSR	X	0.13		0.14	4.7	±	0.1	4.5	3.3
(56)		Y	0.09	0.14		4.6	±	0.2	4.5	3.4
		Z	0.08			5.8	±	0.3	6.2	7.4
2000/05/12-19:51	GSR	X	0.36		0.45	5.4	±	0.2	3.5	3.3
(57)		Y	0.32	0.45		4.0	±	0.9	3.9	3.4
		Z	0.14			6.7	±	0.7	6.2	3.8
2000/05/16-19:52	GSR	X	0.51		0.63	4.0	±	0.1	3.9	3.2
(58)		Y	0.50	0.63		3.9	±	0.0	3.7	3.4
		Z	0.31			6.1	±	0.1	8.8	3.8
2000/05/17-19:54	GSR	X	0.20		0.26	5.7	±	1.5	4.7	3.3
(—)		Y	0.23	0.27		4.2	±	0.3	4.2	3.4
		Z	0.15			7.4	±	0.7	5.7	3.8
2000/05/17-19:59	GSR	X	0.36		0.41	4.1	±	0.2	4.2	3.3
(—)		Y	0.29	0.41		4.1	±	0.5	3.8	3.4
		Z	0.13			4.9	±	0.6	4.8	3.8
2000/05/19-19:51	GSR	X	0.30		0.42	4.3	±	0.2	4.1	3.3
(—)		Y	0.30	0.43		4.4	±	0.2	3.2	3.4
		Z	0.17			5.5	±	1.0	6.1	7.4
2000/05/22-19:55	GSR	X	0.06		0.07	8.9	±	1.2	8.9	3.4
(59)		Y	0.06	0.07		11.1	±	1.8	10.4	3.7
		Z	0.05			19.1	±	3.4	10.6	4.5
2000/05/25-19:50	GSR	X	0.63		0.70	6.2	±	1.1	3.8	3.3
(—)		Y	0.57	0.70		5.9	±	0.5	3.8	3.4
		Z	0.37			20.1	±	0.3	4.6	3.8
2000/05/25-19:57	GSR	X	0.19		0.21	4.4	±	0.5	4.0	3.2
(—)		Y	0.15	0.21		4.4	±	0.2	3.1	3.3
		Z	0.11			6.1	±	1.0	6.2	6.8
2000/05/26-19:53	GSR	X	0.29		0.42	3.5	±	0.3	3.3	3.3
(—)		Y	0.33	0.43		4.6	±	0.3	3.2	3.4
		Z	0.20			7.6	±	0.4	7.7	7.0
2000/05/30-20:07	GSR	X	0.07		0.10	7.1	±	0.7	7.0	2.9
(—)		Y	0.07	0.10		8.6	±	1.7	5.2	3.2
		Z	0.06			6.5	±	1.0	6.0	5.9
2000/05/31-19:52	GSR	X	0.28		0.37	8.5	±	0.2	4.3	3.3
(60)		Y	0.30	0.37		3.7	±	0.6	3.5	3.3
		Z	0.16			5.0	±	0.0	5.3	3.8

Continua . . .

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/06/02-19:55	GSR	X	0.21		0.23	4.5	±	0.5	4.1	3.3
(61)		Y	0.15	0.23		4.3	±	0.3	3.8	3.4
		Z	0.11			6.7	±	0.2	5.6	5.8
2000/06/06-20:00	GSR	X	0.51		0.58	4.1	±	0.0	3.8	3.3
(—)		Y	0.42	0.59		4.1	±	0.2	3.8	3.4
		Z	0.25			20.3	±	2.2	3.8	3.8
2000/06/07-19:51	GSR	X	0.08		0.08	9.4	±	1.8	4.2	3.2
(62)		Y	0.08	0.09		5.2	±	0.3	4.1	3.4
		Z	0.05			28.1	±	2.1	27.8	7.6
2000/06/09-19:52	GSR	X	0.33		0.47	4.9	±	0.1	3.5	3.3
(—)		Y	0.37	0.47		4.5	±	0.1	3.7	3.4
		Z	0.15			5.4	±	0.7	4.4	6.3
2000/06/09-19:55	GSR	X	0.21		0.24	3.9	±	0.1	3.7	3.3
(—)		Y	0.18	0.24		3.8	±	0.2	3.6	3.4
		Z	0.13			20.2	±	1.4	18.5	3.8
2000/06/12-20:02	GSR	X	0.15		0.24	12.4	±	1.5	6.1	3.2
(—)		Y	0.22	0.24		4.0	±	0.0	3.3	3.3
		Z	0.17			21.9	±	3.5	25.0	3.8
2000/06/14-19:52	GSR	X	0.26		0.59	4.7	±	0.7	3.7	3.1
(—)		Y	0.56	0.59		3.9	±	0.4	3.6	3.3
		Z	0.24			5.5	±	0.3	5.8	7.3
2000/06/14-20:00	GSR	X	0.24		0.40	8.1	±	2.0	3.4	3.3
(—)		Y	0.39	0.42		4.2	±	0.1	3.4	3.3
		Z	0.17			5.0	±	0.0	5.5	3.8
2000/06/16-16:07	GSR	X	0.11		0.19	4.0	±	0.3	4.1	3.2
(—)		Y	0.18	0.19		4.6	±	0.6	3.5	3.3
		Z	0.15			23.3	±	1.9	23.8	3.8
2000/06/16-19:55	GSR	X	0.08		0.15	3.7	±	0.4	3.8	3.2
(—)		Y	0.14	0.15		4.1	±	0.2	3.8	3.3
		Z	0.08			23.4	±	1.8	13.5	3.8
2000/06/19-20:07	GSR	X	0.05		0.05	10.9	±	0.6	10.9	3.9
(—)		Y	0.05	0.06		7.1	±	0.8	3.9	4.3
		Z	0.05			16.0	±	0.3	5.4	4.5
2000/06/19-20:15	GSR	X	0.13		0.16	9.6	±	0.1	9.3	3.0
(—)		Y	0.13	0.17		6.3	±	0.3	5.7	3.6
		Z	0.10			16.1	±	0.3	15.6	8.7
2000/06/20-19:49	GSR	X	0.46		0.52	9.4	±	1.1	8.6	3.2
(63)		Y	0.51	0.53		4.9	±	0.0	3.6	3.4
		Z	0.31			24.6	±	4.1	26.3	3.9
2000/06/21-19:47	GSR	X	0.11		0.15	12.9	±	2.4	12.5	3.2
(64)		Y	0.14	0.16		5.7	±	0.4	3.6	3.3
		Z	0.13			20.8	±	2.3	10.6	9.4
2000/06/22-19:56	GSR	X	0.15		0.23	6.4	±	2.1	3.3	3.3
(65)		Y	0.23	0.23		3.5	±	0.6	3.1	3.4
		Z	0.10			7.6	±	0.5	6.6	3.8
2000/06/23-19:47	GSR	X	0.11		0.11	12.8	±	1.1	10.9	4.5
(66)		Y	0.10	0.11		4.3	±	0.2	3.9	3.3
		Z	0.07			6.2	±	0.1	31.2	3.8

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/06/27-20:08	GSR	X	0.18			8.2	±	0.1	8.1	2.8
(—)		Y	0.13	0.19	0.18	8.6	±	0.7	3.7	3.3
		Z	0.11			17.1	±	1.2	15.6	7.6
2000/06/28-14:53	GCR	X	0.44			18.7	±	3.4	18.5	2.8
(—)		Y	0.58	0.63	0.61	8.4	±	3.5	6.2	3.0
		Z	0.35			10.5	±	2.7	20.0	3.1
2000/06/28-15:02	GCR	X	0.24			5.9	±	0.7	3.9	4.1
(—)		Y	0.27	0.29	0.28	5.3	±	0.3	4.8	4.5
		Z	0.18			7.3	±	0.3	5.7	6.2
2000/06/28-19:54	GSR	X	0.09			13.6	±	3.8	13.9	2.7
(—)		Y	0.07	0.12	0.10	7.2	±	0.3	6.3	2.7
		Z	0.11			24.5	±	2.1	25.0	7.3
2000/06/29-14:50	GCR	X	1.03			6.3	±	0.5	6.3	7.3
(—)		Y	0.88	1.29	1.22	6.6	±	0.4	7.8	6.7
		Z	0.45			6.8	±	0.6	6.2	6.7
2000/06/29-15:08	GCR	X	0.85			8.3	±	1.8	6.0	4.2
(—)		Y	0.78	1.03	0.95	6.2	±	1.6	4.1	4.0
		Z	0.60			7.5	±	1.5	19.2	5.6
2000/06/29-17:54	GCR	X	0.77			7.7	±	0.4	7.7	5.0
(—)		Y	1.22	1.32	1.24	4.7	±	0.7	4.6	3.2
		Z	0.58			6.3	±	0.7	5.8	5.3
2000/06/29-19:50	GSR	X	0.06			6.2	±	0.3	5.6	6.3
(—)		Y	0.09	0.09	0.09	9.3	±	0.1	6.4	8.0
		Z	0.08			7.1	±	0.2	7.0	7.1
2000/06/29-20:08	GSR	X	0.10			5.0	±	0.7	4.6	4.5
(—)		Y	0.07	0.11	0.11	6.4	±	2.5	3.7	4.1
		Z	0.10			6.2	±	0.9	5.1	3.8
2000/06/29-22:54	GSR	X	0.18			4.2	±	0.1	3.9	3.4
(—)		Y	0.17	0.25	0.25	3.7	±	0.2	3.3	3.4
		Z	0.12			5.8	±	0.3	4.9	4.6
2000/07/10-22:30	GSR	X	0.27			6.7	±	0.8	6.1	5.7
(—)		Y	0.23	0.36	0.34	6.5	±	0.3	6.1	5.9
		Z	0.16			6.5	±	0.5	6.2	5.8
2000/07/25-19:54	GSR	X	0.63			7.0	±	0.0	6.7	3.3
(—)		Y	0.59	0.71	0.70	3.8	±	0.2	4.2	3.3
		Z	0.39			6.7	±	0.3	6.6	3.8
2000/07/25-19:57	GSR	X	0.11			8.0	±	2.4	5.2	3.3
(—)		Y	0.11	0.12	0.12	5.6	±	1.2	3.0	3.3
		Z	0.10			24.9	±	1.8	26.3	7.3
2000/07/27-19:49	GSR	X	0.06			9.7	±	1.8	7.9	2.8
(67)		Y	0.05	0.07	0.07	11.1	±	3.7	5.1	3.4
		Z	0.04			12.9	±	3.5	7.9	6.0
2000/07/28-19:47	GSR	X	0.15			4.2	±	0.6	3.2	3.2
(68)		Y	0.11	0.18	0.18	3.7	±	0.3	3.2	3.3
		Z	0.10			22.6	±	2.8	22.7	6.5
2000/07/31-19:55	GSR	X	0.34			7.4	±	0.4	6.8	3.3
(69)		Y	0.29	0.38	0.38	4.0	±	0.2	3.8	3.2
		Z	0.23			6.2	±	0.2	6.0	7.2

Continua . . .

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/08/01-19:51	GSR	X	0.23		0.29	4.1	±	0.5	3.8	3.2
(70)		Y	0.20	0.29		6.5	±	0.4	5.2	3.3
		Z	0.15			22.4	±	0.5	26.3	7.4
2000/08/03-19:53	GSR	X	0.12		0.12	11.5	±	0.8	10.9	9.1
(71)		Y	0.06	0.13		5.8	±	1.1	12.2	3.2
		Z	0.12			18.6	±	4.1	13.9	4.5
2000/08/04-19:53	GSR	X	0.18		0.22	8.1	±	0.5	6.6	3.3
(72)		Y	0.22	0.23		5.5	±	0.8	3.8	3.3
		Z	0.17			6.6	±	0.0	6.5	7.4
2000/08/08-19:49	GSR	X	0.14		0.14	9.6	±	0.3	9.1	3.2
(—)		Y	0.08	0.14		5.1	±	0.3	4.3	3.3
		Z	0.10			23.1	±	1.2	6.7	7.4
2000/08/10-19:47	GSR	X	0.67		0.79	7.1	±	0.2	6.8	3.3
(—)		Y	0.63	0.79		4.0	±	0.2	4.0	3.4
		Z	0.41			5.9	±	0.3	5.9	7.1
2000/08/10-20:04	GSR	X	0.05		0.06	3.9	±	0.7	3.3	3.2
(—)		Y	0.04	0.06		5.8	±	0.4	2.9	3.3
		Z	0.04			7.7	±	1.1	7.2	7.3
2000/08/11-19:50	GSR	X	0.09		0.12	5.2	±	1.5	3.7	3.3
(—)		Y	0.10	0.12		3.9	±	0.4	3.9	3.4
		Z	0.05			17.2	±	0.5	4.3	3.8
2000/08/15-19:59	GSR	X	0.06		0.06	8.4	±	1.4	5.0	3.3
(—)		Y	0.05	0.06		4.5	±	1.5	3.2	3.3
		Z	0.03			22.8	±	0.6	16.1	6.9
2000/08/15-20:14	GSR	X	0.13		0.26	7.7	±	1.3	7.9	3.6
(—)		Y	0.26	0.27		4.5	±	0.2	4.2	4.6
		Z	0.10			5.3	±	0.2	4.8	4.5
2000/08/16-19:52	GSR	X	0.10		0.10	4.5	±	0.1	4.3	4.5
(—)		Y	0.07	0.10		5.5	±	0.5	4.2	3.9
		Z	0.08			24.0	±	1.8	23.8	7.2
2000/08/17-19:51	GSR	X	0.16		0.17	7.5	±	0.6	6.3	3.2
(73)		Y	0.14	0.18		3.9	±	0.7	3.8	3.3
		Z	0.11			7.3	±	0.1	8.2	6.6
2000/08/22-20:03	GSR	X	0.16		0.16	10.2	±	1.4	5.4	2.8
(—)		Y	0.13	0.17		11.4	±	2.9	6.1	3.2
		Z	0.13			7.7	±	0.3	6.2	6.0
2000/08/23-19:57	GSR	X	0.07		0.08	10.7	±	0.6	9.3	3.3
(—)		Y	0.06	0.10		5.3	±	0.7	4.7	3.7
		Z	0.09			8.7	±	0.0	7.9	8.8
2000/08/24-15:54	GSR	X	0.09		0.11	3.4	±	0.4	3.4	3.0
(74)		Y	0.08	0.13		4.6	±	0.2	4.7	3.7
		Z	0.09			7.5	±	1.1	7.4	7.0
2000/08/25-20:03	GSR	X	0.06		0.07	6.5	±	0.9	4.5	3.0
(—)		Y	0.05	0.08		9.8	±	2.3	10.0	3.4
		Z	0.05			13.1	±	3.6	17.2	9.1
2000/08/27-07:32	GSR	X	0.11		0.16	6.4	±	0.6	6.2	6.2
(—)		Y	0.16	0.16		6.1	±	0.5	5.2	4.2
		Z	0.07			8.5	±	0.2	7.9	7.6

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/08/29-19:48	GSR	X	0.33		0.44	8.8	±	0.4	4.8	3.2
(—)		Y	0.34	0.44		7.6	±	1.0	11.1	4.5
		Z	0.28			8.5	±	0.5	7.1	5.8
2000/08/30-20:04	GSR	X	0.17		0.25	3.9	±	1.1	3.8	3.3
(—)		Y	0.21	0.25		3.6	±	0.3	3.9	3.4
		Z	0.09			18.8	±	0.9	4.8	3.8
2000/08/31-19:59	GSR	X	0.08		0.14	7.3	±	1.0	7.4	5.8
(—)		Y	0.12	0.15		5.7	±	0.3	4.2	5.7
		Z	0.07			22.9	±	8.8	23.8	8.7
2000/09/01-19:58	GSR	X	0.42		0.58	8.0	±	0.2	4.9	3.3
(—)		Y	0.45	0.58		3.9	±	0.1	4.1	3.4
		Z	0.30			5.8	±	0.4	6.0	7.0
2000/09/01-20:01	GSR	X	0.18		0.19	4.4	±	0.3	3.9	3.2
(—)		Y	0.12	0.19		4.3	±	1.3	3.1	3.3
		Z	0.17			22.0	±	0.4	17.9	6.6
2000/09/04-20:01	GSR	X	0.06		0.08	5.0	±	0.1	3.8	3.3
(75)		Y	0.07	0.08		4.3	±	0.4	3.1	3.4
		Z	0.04			13.9	±	2.0	13.9	3.7
2000/09/05-19:54	GSR	X	0.06		0.07	4.0	±	0.4	4.1	3.1
(—)		Y	0.05	0.07		5.2	±	1.9	4.3	3.7
		Z	0.05			6.2	±	0.1	5.4	6.1
2000/09/07-19:47	GSR	X	0.17		0.22	10.6	±	0.5	10.4	3.2
(—)		Y	0.17	0.22		11.8	±	0.3	11.1	4.5
		Z	0.11			7.5	±	0.3	8.9	6.9
2000/09/07-19:53	GSR	X	0.07		0.07	6.6	±	1.3	6.4	3.6
(—)		Y	0.06	0.07		5.0	±	0.1	4.4	3.3
		Z	0.05			6.6	±	1.2	7.4	6.1
2000/09/08-19:52	GSR	X	0.05		0.07	4.7	±	0.7	4.4	3.3
(—)		Y	0.06	0.07		3.9	±	0.0	4.5	3.4
		Z	0.03			6.3	±	0.0	6.2	7.1
2000/09/08-22:58	GSR	X	0.13		0.16	8.3	±	1.5	8.6	3.1
(—)		Y	0.16	0.18		13.9	±	1.5	4.6	3.7
		Z	0.10			20.9	±	0.0	20.8	3.8
2000/09/09-16:09	GSR	X	0.09		0.10	8.0	±	0.4	8.1	8.8
(76)		Y	0.10	0.12		8.5	±	2.0	7.5	6.2
		Z	0.12			9.1	±	0.2	8.9	9.0
2000/09/11-19:53	GSR	X	0.09		0.11	4.0	±	0.5	3.3	2.8
(77)		Y	0.08	0.11		9.2	±	1.8	8.6	3.3
		Z	0.06			28.9	±	1.1	25.0	7.1
2000/09/14-20:04	GSR	X	0.06		0.07	9.3	±	1.4	7.9	3.3
(78)		Y	0.06	0.07		4.4	±	1.0	3.6	3.4
		Z	0.05			19.1	±	2.0	17.2	6.1
2000/09/18-19:50	GSR	X	0.58		0.87	3.5	±	0.2	3.4	3.2
(—)		Y	0.70	0.87		3.8	±	0.1	3.6	3.3
		Z	0.37			6.2	±	1.6	5.3	7.2
2000/09/18-19:53	GSR	X	0.36		0.41	4.1	±	0.5	4.0	3.3
(—)		Y	0.34	0.41		3.7	±	0.5	3.5	3.3
		Z	0.22			5.7	±	0.1	5.4	4.5

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/09/20-15:50	GSR	X	0.12		0.15	7.6	±	1.4	5.4	2.9
(—)		Y	0.13	0.15		7.0	±	0.7	7.0	3.4
		Z	0.13			9.1	±	0.3	6.9	7.3
2000/09/20-19:50	GSR	X	0.21		0.26	7.3	±	1.5	3.6	3.3
(—)		Y	0.25	0.28		4.9	±	0.2	3.8	3.7
		Z	0.12			16.5	±	1.0	15.2	3.9
2000/09/21-19:50	GSR	X	0.15		0.18	8.7	±	2.4	6.0	6.1
(—)		Y	0.12	0.20		10.9	±	1.0	9.6	4.6
		Z	0.17			8.1	±	0.9	7.7	7.4
2000/09/21-19:55	GSR	X	0.10		0.10	8.1	±	0.7	8.2	3.5
(—)		Y	0.08	0.10		4.3	±	0.6	4.3	3.8
		Z	0.06			18.3	±	0.2	7.1	7.3
2000/09/22-19:50	GSR	X	0.37		0.49	3.4	±	0.4	3.4	3.3
(—)		Y	0.36	0.49		3.5	±	0.4	3.4	3.4
		Z	0.17			5.3	±	0.4	5.2	7.0
2000/09/22-19:57	GSR	X	0.55		0.94	4.0	±	0.6	3.7	3.3
(—)		Y	0.79	0.94		4.2	±	0.0	3.9	3.4
		Z	0.29			6.3	±	0.5	5.6	3.8
2000/09/26-19:54	GSR	X	0.06		0.06	4.2	±	0.1	3.8	3.6
(79)		Y	0.06	0.07		4.9	±	0.4	3.8	2.7
		Z	0.03			8.5	±	0.6	6.6	5.9
2000/09/27-19:56	GSR	X	0.11		0.16	13.6	±	1.7	12.8	3.4
(80)		Y	0.14	0.16		8.8	±	0.1	8.9	3.3
		Z	0.10			14.8	±	2.5	15.2	6.1
2000/09/28-15:57	GSR	X	0.10		0.12	6.8	±	3.2	5.1	3.4
(—)		Y	0.10	0.12		14.5	±	0.4	4.1	3.7
		Z	0.07			12.9	±	1.4	18.5	3.8
2000/09/28-19:54	GSR	X	0.12		0.12	12.1	±	0.1	11.9	11.2
(—)		Y	0.08	0.12		12.1	±	0.3	13.2	11.1
		Z	0.07			12.8	±	1.0	11.6	10.7
2000/09/29-19:52	GSR	X	0.44		0.47	9.0	±	0.0	8.1	3.6
(81)		Y	0.36	0.47		4.0	±	0.3	4.1	3.3
		Z	0.28			6.6	±	0.2	6.4	3.8
2000/10/02-19:56	GSR	X	0.19		0.29	6.3	±	0.3	3.2	3.3
(82)		Y	0.26	0.29		3.7	±	0.3	4.1	3.4
		Z	0.20			19.9	±	0.2	16.1	3.8
2000/10/03-20:06	GSR	X	0.15		0.20	9.0	±	0.2	8.3	5.8
(83)		Y	0.15	0.20		12.6	±	0.0	11.9	6.0
		Z	0.17			21.6	±	0.9	6.5	6.6
2000/10/03-20:16	GSR	X	0.08		0.12	4.6	±	0.8	3.6	3.3
(84)		Y	0.11	0.14		9.6	±	0.8	4.3	3.4
		Z	0.10			9.4	±	0.2	8.6	7.2
2000/10/04-19:45	GSR	X	0.44		0.66	3.5	±	0.2	3.4	3.2
(—)		Y	0.50	0.67		3.8	±	0.2	3.5	3.3
		Z	0.27			6.5	±	2.0	5.3	7.2
2000/10/04-19:57	GSR	X	0.07		0.08	7.3	±	2.2	4.1	3.2
(—)		Y	0.08	0.08		3.6	±	0.2	3.9	3.2
		Z	0.04			13.5	±	0.0	12.8	4.3

Continua ...

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/10/05-20:01	GSR	X	0.33		0.35	7.6	±	1.7	5.0	2.8
(—)		Y	0.21	0.36		8.8	±	1.2	7.5	4.5
		Z	0.29			6.7	±	0.6	6.0	6.0
2000/10/06-19:50	GSR	X	0.16		0.19	4.6	±	0.7	4.7	3.3
(85)		Y	0.14	0.19		5.6	±	1.6	3.9	3.4
		Z	0.13			20.6	±	2.9	7.4	9.3
2000/10/09-19:47	GSR	X	0.60		0.80	3.9	±	0.5	3.7	3.2
(—)		Y	0.54	0.80		3.7	±	0.5	3.9	3.3
		Z	0.50			6.5	±	0.2	6.0	7.2
2000/10/10-19:59	GSR	X	0.05		0.07	4.8	±	0.1	4.6	3.8
(86)		Y	0.07	0.07		6.8	±	1.7	6.7	4.7
		Z	0.05			14.6	±	2.2	13.9	6.7
2000/10/11-19:47	GSR	X	0.19		0.23	11.0	±	1.2	11.4	3.3
(—)		Y	0.22	0.24		3.6	±	0.2	3.8	3.6
		Z	0.17			16.9	±	0.6	13.2	3.8
2000/10/12-19:58	GSR	X	0.09		0.14	7.3	±	1.4	6.8	3.4
(87)		Y	0.14	0.14		4.5	±	0.4	4.7	3.3
		Z	0.07			5.1	±	0.0	4.5	4.9
2000/10/13-19:53	GSR	X	0.11		0.15	9.3	±	0.7	7.7	3.2
(—)		Y	0.15	0.15		4.1	±	0.0	3.9	3.7
		Z	0.06			10.3	±	0.6	7.0	4.5
2000/10/13-20:03	GSR	X	0.10		0.10	10.0	±	1.0	9.4	3.6
(—)		Y	0.06	0.10		6.7	±	1.0	6.8	4.2
		Z	0.05			12.3	±	1.0	11.6	4.5
2000/10/17-19:59	GSR	X	0.52		0.67	3.9	±	0.1	3.3	3.2
(88)		Y	0.45	0.67		3.8	±	0.0	3.4	3.3
		Z	0.25			17.4	±	0.3	15.6	4.5
2000/10/18-19:53	GSR	X	0.14		0.17	7.6	±	0.6	7.0	3.6
(89)		Y	0.15	0.18		14.2	±	1.0	6.8	3.8
		Z	0.17			8.2	±	0.1	7.2	6.7
2000/10/19-20:16	GSR	X	0.39		0.55	3.3	±	0.0	3.3	3.2
(90)		Y	0.38	0.55		3.7	±	0.7	3.7	3.3
		Z	0.24			21.4	±	0.9	8.3	3.6
2000/10/20-19:59	GSR	X	0.14		0.21	4.4	±	0.5	3.4	2.9
(91)		Y	0.18	0.21		5.6	±	0.1	4.0	3.4
		Z	0.06			7.5	±	0.3	7.5	5.7
2000/10/23-20:02	GSR	X	0.21		0.28	4.2	±	0.1	4.1	3.6
(—)		Y	0.26	0.28		13.9	±	0.4	5.2	3.7
		Z	0.17			20.8	±	0.5	19.2	6.5
2000/10/24-19:52	GSR	X	0.09		0.10	5.5	±	0.5	4.9	5.7
(—)		Y	0.08	0.11		10.6	±	2.2	5.1	3.1
		Z	0.08			6.3	±	0.2	6.8	7.4
2000/10/25-22:48	GSR	X	0.11		0.17	6.9	±	0.8	5.7	3.3
(—)		Y	0.16	0.19		4.0	±	0.4	4.3	3.3
		Z	0.11			4.9	±	0.3	5.1	4.9
2000/10/26-19:55	GSR	X	0.42		0.42	11.5	±	3.3	11.6	3.3
(—)		Y	0.32	0.46		4.6	±	0.6	4.8	3.4
		Z	0.46			17.8	±	0.4	6.5	7.1

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/10/27-19:59	GSR	X	0.06		0.06	4.9	±	0.0	4.3	4.7
(92)		Y	0.06	0.06		3.9	±	0.3	4.1	4.4
		Z	0.04			9.5	±	2.7	11.4	4.3
2000/10/30-19:53	GSR	X	0.17		0.17	10.8	±	0.4	10.0	3.0
(—)		Y	0.12	0.17		15.6	±	1.1	22.7	3.6
		Z	0.14			21.6	±	1.3	19.2	6.0
2000/10/31-22:54	GSR	X	0.06		0.06	3.9	±	0.3	3.6	3.3
(—)		Y	0.06	0.07		5.1	±	0.9	3.7	3.4
		Z	0.03			12.8	±	3.6	8.6	4.3
2000/11/01-20:06	GSR	X	0.59		0.78	3.7	±	0.2	3.3	3.2
(93)		Y	0.52	0.78		3.7	±	0.2	3.6	3.3
		Z	0.22			4.8	±	0.9	4.9	4.5
2000/11/02-19:50	GSR	X	0.12		0.19	7.5	±	1.2	4.3	3.3
(94)		Y	0.19	0.19		4.2	±	0.1	3.4	3.6
		Z	0.08			19.3	±	2.7	18.5	3.8
2000/11/03-20:03	GSR	X	0.15		0.15	8.2	±	1.3	5.0	2.9
(—)		Y	0.11	0.18		8.5	±	2.7	4.2	3.4
		Z	0.14			8.0	±	0.2	5.8	6.1
2000/11/07-20:09	GSR	X	0.10		0.11	4.2	±	0.2	4.2	5.4
(—)		Y	0.09	0.12		6.0	±	0.7	4.9	4.3
		Z	0.08			6.5	±	0.5	6.2	4.9
2000/11/08-19:57	GSR	X	0.22		0.24	6.7	±	0.8	3.4	3.2
(—)		Y	0.17	0.24		5.2	±	1.5	3.2	3.3
		Z	0.13			18.0	±	2.7	16.7	6.5
2000/11/08-20:33	GSR	X	0.12		0.14	7.8	±	0.5	8.2	3.8
(—)		Y	0.11	0.15		8.2	±	0.2	7.4	3.4
		Z	0.14			16.3	±	0.0	7.1	9.3
2000/11/09-19:52	GSR	X	0.21		0.28	7.8	±	0.6	6.8	2.8
(95)		Y	0.28	0.29		4.9	±	0.7	5.0	3.8
		Z	0.16			6.0	±	0.7	5.4	6.6
2000/11/10-19:52	GSR	X	0.55		0.75	3.9	±	0.1	3.8	3.2
(—)		Y	0.52	0.75		3.6	±	0.0	3.5	3.3
		Z	0.42			5.6	±	0.4	5.9	7.2
2000/11/14-19:54	GSR	X	0.02		0.06	4.6	±	1.0	4.7	3.6
(—)		Y	0.06	0.06		5.3	±	0.0	4.5	4.5
		Z	0.03			5.7	±	0.7	5.2	6.3
2000/11/14-19:55	GSR	X	0.10		0.15	7.6	±	0.4	5.8	3.3
(—)		Y	0.15	0.16		4.8	±	0.2	3.9	4.5
		Z	0.11			23.9	±	1.6	27.8	4.3
2000/11/15-19:50	GSR	X	0.20		0.27	4.0	±	0.3	3.7	3.3
(—)		Y	0.26	0.28		4.5	±	0.3	3.5	3.4
		Z	0.16			6.6	±	0.8	6.4	7.3
2000/11/16-19:55	GSR	X	0.07		0.08	4.3	±	0.5	4.2	3.5
(96)		Y	0.07	0.08		4.5	±	0.3	4.3	3.3
		Z	0.04			7.6	±	0.2	6.3	6.7
2000/11/17-19:54	GSR	X	0.12		0.15	4.2	±	0.5	4.0	2.8
(—)		Y	0.14	0.15		4.4	±	0.2	4.5	3.8
		Z	0.06			7.0	±	0.1	7.4	6.9

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/11/17-22:47	GSR	X	0.18		0.18	12.0	±	2.0	6.3	3.3
(—)		Y	0.16	0.19		4.2	±	1.3	3.3	3.4
		Z	0.16			24.2	±	0.0	26.3	3.8
2000/11/20-20:08	GSR	X	0.24		0.27	10.8	±	1.6	10.2	3.2
(—)		Y	0.16	0.27		4.0	±	0.5	3.6	3.3
		Z	0.12			17.1	±	1.2	16.1	3.6
2000/11/21-19:49	GSR	X	0.08		0.10	4.3	±	0.9	3.5	3.6
(97)		Y	0.09	0.10		4.5	±	0.3	3.9	3.4
		Z	0.05			7.4	±	0.7	13.5	6.1
2000/11/22-22:55	GSR	X	0.42		0.60	4.0	±	0.5	3.8	3.2
(—)		Y	0.44	0.60		3.9	±	0.6	3.5	3.3
		Z	0.36			6.1	±	0.7	5.9	7.3
2000/11/23-19:52	GSR	X	0.04		0.08	5.1	±	0.9	3.4	3.3
(98)		Y	0.08	0.08		4.0	±	0.0	3.6	3.4
		Z	0.04			5.1	±	0.8	5.2	4.4
2000/11/24-19:52	GSR	X	0.07		0.10	7.8	±	2.3	4.9	5.1
(99)		Y	0.09	0.10		9.8	±	2.4	7.1	4.4
		Z	0.07			8.3	±	0.9	7.8	7.6
2000/11/27-20:04	GSR	X	0.07		0.07	3.8	±	1.2	3.3	3.4
(—)		Y	0.07	0.08		5.9	±	0.4	3.9	3.3
		Z	0.05			17.7	±	1.0	15.6	6.7
2000/11/28-22:51	GSR	X	0.45		0.60	4.1	±	0.3	4.1	3.3
(—)		Y	0.48	0.61		3.8	±	0.0	3.1	3.3
		Z	0.36			6.1	±	0.2	6.1	7.3
2000/11/29-19:48	GSR	X	0.19		0.19	9.0	±	1.7	7.8	3.3
(100)		Y	0.16	0.19		6.0	±	1.2	3.6	3.4
		Z	0.19			16.8	±	1.2	13.2	9.5
2000/11/30-19:52	GSR	X	0.11		0.14	10.2	±	0.6	8.8	3.5
(101)		Y	0.14	0.15		14.0	±	0.7	8.8	9.6
		Z	0.12			8.3	±	0.2	8.1	9.4
2000/12/01-19:50	GSR	X	0.47		0.48	8.8	±	0.1	8.9	3.2
(—)		Y	0.37	0.50		4.8	±	0.0	3.2	3.3
		Z	0.26			21.9	±	0.3	8.1	7.4
2000/12/04-16:14	GSR	X	0.11		0.11	7.7	±	1.7	6.0	3.5
(102)		Y	0.10	0.12		12.1	±	1.0	11.6	3.2
		Z	0.12			21.3	±	0.7	20.8	10.9
2000/12/05-19:59	GSR	X	0.10		0.10	9.7	±	1.0	9.3	3.3
(—)		Y	0.07	0.10		7.5	±	1.0	6.3	3.4
		Z	0.07			13.0	±	1.1	11.4	11.4
2000/12/06-19:46	GSR	X	0.53		0.69	4.0	±	0.3	4.1	3.2
(—)		Y	0.52	0.69		4.0	±	0.2	3.6	3.3
		Z	0.54			6.2	±	0.5	6.0	7.2
2000/12/07-19:57	GSR	X	0.11		0.12	12.2	±	0.1	11.4	9.8
(—)		Y	0.06	0.12		10.3	±	2.8	10.9	6.0
		Z	0.11			22.2	±	0.7	20.0	9.5
2000/12/07-20:05	GSR	X	0.21		0.21	9.1	±	0.5	8.3	3.6
(—)		Y	0.19	0.24		7.3	±	0.5	7.0	3.3
		Z	0.18			16.0	±	3.5	7.6	9.3

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2000/12/13-20:02	GSR	X	0.35		0.48	6.1	±	0.7	3.8	3.3
(—)		Y	0.47	0.48		8.2	±	1.8	3.2	3.2
		Z	0.46			19.2	±	1.3	14.7	3.8
2000/12/13-22:53	GSR	X	0.07		0.09	6.1	±	0.6	4.5	3.6
(—)		Y	0.08	0.09		3.6	±	0.5	3.8	3.3
		Z	0.06			12.6	±	0.6	11.4	7.6
2000/12/14-19:47	GSR	X	0.21		0.25	3.9	±	0.3	3.8	3.4
(103)		Y	0.22	0.26		8.1	±	1.0	3.2	3.3
		Z	0.18			26.0	±	0.4	26.3	3.9
2000/12/15-19:49	GSR	X	0.10		0.16	11.0	±	0.2	10.2	3.3
(—)		Y	0.15	0.17		5.4	±	0.7	4.5	3.2
		Z	0.12			25.3	±	3.4	25.0	6.5
2000/12/18-20:06	GSR	X	0.42		0.68	3.7	±	0.0	3.6	3.3
(—)		Y	0.61	0.68		4.1	±	0.4	3.7	3.3
		Z	0.43			5.9	±	0.5	5.8	7.3
2000/12/19-19:50	GSR	X	0.16		0.16	5.7	±	0.4	5.4	3.3
(104)		Y	0.13	0.16		7.5	±	0.5	6.1	3.5
		Z	0.11			20.4	±	3.8	6.3	6.6
2000/12/20-19:56	GSR	X	0.42		0.55	5.3	±	0.6	5.3	3.7
(—)		Y	0.51	0.55		4.2	±	0.2	4.1	3.6
		Z	0.30			5.4	±	0.5	5.2	6.6
2000/12/21-20:01	GSR	X	0.43		0.66	3.9	±	0.2	3.6	3.3
(—)		Y	0.57	0.66		4.0	±	0.2	2.6	3.3
		Z	0.42			6.2	±	0.3	6.2	7.3
2001/02/01-19:49	GSR	X	0.05		0.09	3.9	±	0.5	3.4	3.3
(—)		Y	0.08	0.09		3.8	±	0.7	2.9	3.3
		Z	0.05			6.0	±	0.4	5.7	7.4
2001/02/02-19:50	GSR	X	0.16		0.16	13.1	±	0.5	12.8	3.3
(105)		Y	0.15	0.16		8.1	±	0.5	7.8	5.9
		Z	0.14			7.7	±	0.0	7.4	7.4
2001/02/05-19:53	GSR	X	0.25		0.27	6.0	±	0.7	5.2	3.3
(—)		Y	0.26	0.28		4.2	±	0.2	4.1	3.8
		Z	0.14			8.2	±	1.1	4.0	3.7
2001/02/06-20:03	GSR	X	0.17		0.22	10.3	±	1.4	10.0	3.3
(106)		Y	0.22	0.22		8.8	±	1.8	11.1	3.2
		Z	0.15			15.8	±	2.1	15.2	6.9
2001/02/07-19:47	GSR	X	0.34		0.50	3.5	±	0.4	3.6	3.3
(107)		Y	0.42	0.50		5.8	±	0.5	2.9	3.2
		Z	0.24			6.1	±	0.7	5.6	5.9
2001/02/07-19:59	GSR	X	0.09		0.09	3.7	±	0.2	3.7	3.3
(108)		Y	0.07	0.10		4.6	±	0.6	3.9	3.3
		Z	0.09			6.5	±	0.1	5.6	4.9
2001/02/08-19:52	GSR	X	0.59		0.82	11.1	±	0.3	10.6	3.3
(—)		Y	0.81	0.82		7.3	±	0.3	8.6	3.2
		Z	0.57			9.1	±	1.0	17.2	7.3
2001/02/09-19:58	GSR	X	0.15		0.19	4.5	±	0.1	4.3	3.4
(—)		Y	0.19	0.19		10.4	±	0.7	3.4	3.2
		Z	0.13			19.0	±	0.6	18.5	3.8

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2001/02/12-19:48	GSR	X	0.05		0.07	5.1	±	0.7	5.0	3.8
(109)		Y	0.07	0.07		7.3	±	1.3	7.5	3.6
		Z	0.04			13.5	±	1.3	13.2	6.0
2001/02/13-19:51	GSR	X	0.13		0.20	8.9	±	0.7	8.8	3.3
(110)		Y	0.18	0.20		5.7	±	0.5	3.2	3.5
		Z	0.14			13.9	±	3.9	14.7	8.2
2001/02/16-19:50	GSR	X	0.35		0.75	3.7	±	0.9	3.3	3.3
(111)		Y	0.74	0.75		8.3	±	1.0	2.6	3.2
		Z	0.59			7.4	±	0.5	6.9	7.3
2001/02/19-20:06	GSR	X	0.07		0.13	4.4	±	0.2	4.1	3.3
(—)		Y	0.13	0.14		4.3	±	0.8	4.2	3.2
		Z	0.09			19.4	±	1.6	5.6	7.4
2001/02/20-19:58	GSR	X	0.06		0.09	10.4	±	2.0	7.9	3.3
(—)		Y	0.08	0.09		17.2	±	2.1	16.1	3.3
		Z	0.06			21.9	±	2.8	15.6	7.3
2001/02/21-19:51	GSR	X	0.10		0.20	3.9	±	0.4	4.0	3.3
(112)		Y	0.18	0.20		4.9	±	0.2	8.9	3.2
		Z	0.16			8.6	±	0.2	8.2	7.3
2001/02/23-19:59	GSR	X	0.07		0.14	4.7	±	0.6	4.1	3.8
(113)		Y	0.13	0.14		9.5	±	0.4	8.6	3.3
		Z	0.13			19.8	±	0.5	18.5	16.8
2001/02/27-19:49	GSR	X	0.13		0.20	5.2	±	0.0	5.4	6.3
(114)		Y	0.19	0.20		7.8	±	0.7	5.9	5.9
		Z	0.16			7.1	±	0.8	6.6	7.3
2001/02/28-19:49	GSR	X	0.07		0.09	8.0	±	1.1	5.7	3.2
(115)		Y	0.06	0.10		6.6	±	1.7	5.1	3.3
		Z	0.06			10.7	±	1.1	7.9	7.1
2001/03/02-19:55	GSR	X	0.09		0.13	5.0	±	0.7	5.3	4.4
(—)		Y	0.12	0.14		7.0	±	1.5	4.6	4.4
		Z	0.13			17.0	±	2.9	13.5	6.2
2001/03/05-20:03	GSR	X	0.38		0.82	7.2	±	0.4	5.9	3.3
(—)		Y	0.81	0.82		10.4	±	0.5	4.5	3.2
		Z	0.50			19.3	±	0.2	18.5	7.3
2001/03/05-20:11	GSR	X	0.22		0.38	6.8	±	0.5	7.4	3.3
(—)		Y	0.33	0.39		7.7	±	0.1	5.2	3.5
		Z	0.19			7.8	±	0.1	7.0	6.8
2001/03/06-19:51	GSR	X	0.11		0.14	9.7	±	1.7	7.7	3.2
(—)		Y	0.14	0.14		9.4	±	0.3	9.4	3.1
		Z	0.08			19.0	±	3.7	16.1	7.4
2001/03/07-19:59	GSR	X	0.80		1.52	3.4	±	0.3	3.5	3.3
(116)		Y	1.33	1.59		5.3	±	0.6	4.0	3.2
		Z	0.94			6.4	±	0.5	7.4	7.2
2001/03/08-19:51	GSR	X	0.11		0.11	6.2	±	0.9	5.7	3.3
(117)		Y	0.09	0.13		9.4	±	0.9	8.8	3.3
		Z	0.10			6.8	±	0.0	6.2	4.9
2001/03/12-19:51	GSR	X	0.30		0.32	8.0	±	0.9	7.2	3.8
(118)		Y	0.30	0.33		10.6	±	2.2	4.5	3.9
		Z	0.27			19.4	±	2.2	18.5	6.5

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2001/03/13-19:52	GSR	X	0.07		0.09	6.3	±	0.2	3.4	3.8
(119)		Y	0.09	0.09		9.3	±	1.4	12.5	3.5
		Z	0.07			17.7	±	0.6	17.9	5.8
2001/03/14-19:51	GSR	X	0.12		0.14	5.5	±	1.5	5.0	3.4
(—)		Y	0.14	0.16		6.4	±	0.4	5.1	3.3
		Z	0.13			6.4	±	0.3	6.8	7.5
2001/03/14-20:02	GSR	X	0.34		0.48	9.0	±	0.5	8.9	3.4
(—)		Y	0.42	0.49		8.1	±	0.1	4.1	3.3
		Z	0.26			7.3	±	0.5	7.6	6.8
2001/03/21-19:52	GSR	X	0.42		0.58	8.2	±	1.0	7.8	3.4
(120)		Y	0.55	0.59		9.0	±	1.9	8.5	3.2
		Z	0.31			14.9	±	0.5	13.2	9.3
2001/03/22-19:47	GSR	X	0.07		0.08	7.5	±	0.5	6.3	6.2
(121)		Y	0.08	0.10		4.9	±	0.0	4.5	5.7
		Z	0.10			15.5	±	0.5	14.7	6.2
2001/03/23-20:12	GSR	X	0.09		0.09	13.6	±	0.8	13.2	3.4
(—)		Y	0.09	0.11		11.4	±	3.2	10.9	5.4
		Z	0.10			19.0	±	2.3	17.9	7.3
2001/03/26-19:55	GSR	X	0.26		0.41	5.4	±	0.3	4.9	3.3
(122)		Y	0.40	0.41		7.9	±	0.4	4.9	3.5
		Z	0.27			10.7	±	0.3	11.6	6.8
2001/03/30-19:50	GSR	X	0.42		0.97	7.8	±	0.9	7.2	3.3
(—)		Y	0.93	0.97		10.7	±	0.1	12.2	2.9
		Z	0.92			18.7	±	3.6	21.7	7.2
2001/04/02-19:53	GSR	X	0.56		1.12	8.1	±	0.9	7.9	3.3
(123)		Y	1.04	1.12		9.5	±	0.5	12.5	3.2
		Z	0.60			8.4	±	0.9	8.1	10.4
2001/04/05-22:59	GSR	X	0.38		0.48	7.0	±	1.5	7.0	3.3
(—)		Y	0.41	0.49		6.9	±	0.2	6.3	3.3
		Z	0.24			6.7	±	0.6	6.9	7.3
2001/04/09-20:03	GSR	X	0.54		0.57	4.2	±	0.2	3.8	3.3
(124)		Y	0.54	0.58		4.3	±	2.1	3.4	3.6
		Z	0.28			11.5	±	3.0	17.2	3.8
2001/04/10-19:51	GSR	X	0.24		0.32	7.8	±	0.9	5.3	3.3
(—)		Y	0.32	0.32		13.0	±	0.5	4.4	3.2
		Z	0.25			20.8	±	1.0	18.5	6.8
2001/04/11-19:47	GSR	X	0.21		0.33	3.4	±	0.3	3.4	3.4
(—)		Y	0.31	0.33		5.3	±	1.0	3.4	3.2
		Z	0.14			16.3	±	0.7	15.2	6.4
2001/04/11-19:57	GSR	X	0.06		0.08	4.6	±	1.3	3.9	3.3
(—)		Y	0.05	0.08		4.5	±	0.2	4.7	3.7
		Z	0.05			18.4	±	0.3	14.7	7.3
2001/04/17-19:55	GSR	X	0.13		0.14	10.7	±	0.0	10.9	6.5
(125)		Y	0.13	0.18		10.0	±	0.6	10.0	3.6
		Z	0.12			10.5	±	0.5	9.6	7.0
2001/04/18-19:54	GSR	X	0.37		0.75	11.7	±	1.3	11.9	3.3
(—)		Y	0.70	0.76		10.3	±	1.6	10.2	3.2
		Z	0.58			17.5	±	2.7	16.1	10.5

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz]				
						I			B	F
2001/04/20-19:51	GSR	X	0.51			3.7	±	0.6	3.2	3.4
(126)		Y	0.81	0.85	0.84	4.8	±	0.6	3.4	3.3
		Z	0.48			16.4	±	1.2	15.6	6.9
2001/04/23-20:03	GSR	X	0.16			5.2	±	0.7	4.6	3.4
(—)		Y	0.14	0.20	0.19	7.1	±	0.0	4.0	3.3
		Z	0.09			19.0	±	5.8	13.9	6.8
2001/04/24-19:55	GSR	X	0.10			11.6	±	1.8	11.4	3.8
(127)		Y	0.12	0.15	0.15	9.2	±	0.7	8.6	3.1
		Z	0.10			16.6	±	0.2	14.7	6.5
2001/04/25-19:51	GSR	X	0.41			4.4	±	0.0	3.7	3.4
(128)		Y	0.56	0.57	0.56	5.8	±	0.0	2.5	3.6
		Z	0.32			16.1	±	2.8	12.8	4.5
2001/04/26-19:52	GSR	X	0.10			7.4	±	1.6	4.4	3.3
(—)		Y	0.10	0.11	0.11	12.7	±	1.1	7.9	3.3
		Z	0.11			18.8	±	2.2	17.9	7.6
2001/05/04-19:50	GSR	X	0.96			3.8	±	0.3	3.7	3.4
(129)		Y	0.96	1.32	1.32	3.8	±	0.2	3.5	3.3
		Z	0.27			15.7	±	2.3	9.3	6.8
2001/05/23-19:48	GSR	X	0.12			8.3	±	0.3	7.8	3.2
(130)		Y	0.16	0.17	0.17	7.7	±	0.2	5.2	3.2
		Z	0.06			5.7	±	2.2	3.5	4.2
2001/05/25-19:50	GSR	X	0.05			11.0	±	1.0	10.4	2.9
(131)		Y	0.09	0.10	0.10	9.9	±	0.7	5.6	3.1
		Z	0.05			11.0	±	1.7	10.2	2.9
2001/05/30-19:51	GSR	X	0.07			9.6	±	2.4	9.8	2.9
(132)		Y	0.07	0.09	0.08	7.8	±	2.3	4.8	3.1
		Z	0.05			8.2	±	3.2	3.4	2.9
2001/07/03-19:48	GSR	X	0.06			14.9	±	0.9	13.9	3.2
(—)		Y	0.05	0.08	0.07	9.1	±	0.1	11.6	11.0
		Z	0.04			13.6	±	1.7	20.0	6.0
2001/07/04-23:29	GSR	X	0.08			9.3	±	0.2	9.6	2.9
(—)		Y	0.08	0.10	0.10	15.9	±	0.3	5.6	3.2
		Z	0.04			19.1	±	3.3	17.2	5.7
2001/07/06-14:56	GCR	X	0.38			3.2	±	0.2	3.1	2.6
(133)		Y	0.28	0.44	0.44	3.2	±	0.1	3.4	3.2
		Z	0.20			13.7	±	0.8	4.2	5.1
2001/07/06-19:56	GSR	X	0.11			4.6	±	0.0	3.0	3.1
(134)		Y	0.17	0.19	0.17	7.4	±	0.6	4.3	3.2
		Z	0.07			3.8	±	0.7	6.4	4.5
2001/07/10-14:48	GCR	X	0.24			5.7	±	1.1	3.7	2.6
(135)		Y	0.22	0.28	0.28	3.4	±	0.5	3.4	3.2
		Z	0.08			16.0	±	1.3	20.8	2.8
2001/07/10-19:47	GSR	X	0.05			3.8	±	0.1	3.4	3.1
(136)		Y	0.08	0.09	0.09	9.4	±	1.1	9.3	3.2
		Z	0.04			13.6	±	2.0	3.4	2.9
2001/07/11-14:53	GCR	X	0.12			8.4	±	1.2	8.5	2.6
(137)		Y	0.18	0.19	0.19	6.4	±	1.4	6.3	3.1
		Z	0.11			14.8	±	0.6	14.3	9.2

Continua . . .

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2001/07/11-19:52 (138)	GSR	X	0.04	0.07	0.06	10.6	±	0.8	10.6	2.9
		Y	0.06			9.5	±	0.9	9.1	3.2
		Z	0.03			9.4	±	0.7	9.3	6.7
2001/07/13-14:46 (139)	GCR	X	0.10	0.11	0.10	3.6	±	0.4	3.3	2.7
		Y	0.06			8.9	±	1.7	3.7	3.3
		Z	0.04			5.2	±	1.1	4.4	5.1
2001/07/16-14:51 (140)	GCR	X	0.10	0.15	0.15	7.4	±	0.5	7.5	2.6
		Y	0.14			5.5	±	1.3	2.9	3.2
		Z	0.10			6.5	±	0.9	5.6	3.2
2001/07/16-19:51 (141)	GSR	X	0.04	0.04	0.04	3.7	±	0.4	3.1	2.9
		Y	0.03			3.5	±	0.4	2.4	3.1
		Z	0.01			5.3	±	0.4	3.4	3.8
2001/07/17-14:52 (—)	GCR	X	0.17	0.21	0.20	8.5	±	0.2	8.3	3.0
		Y	0.20			9.1	±	0.4	9.1	3.2
		Z	0.18			13.6	±	0.6	6.7	4.2
2001/07/18-14:53 (142)	GCR	X	0.15	0.23	0.23	10.6	±	0.9	10.2	2.6
		Y	0.23			7.8	±	0.1	8.9	3.1
		Z	0.14			14.4	±	0.7	7.6	9.3
2001/07/18-19:53 (143)	GSR	X	0.07	0.08	0.08	8.7	±	1.1	5.5	2.9
		Y	0.07			8.7	±	0.7	8.6	3.2
		Z	0.04			9.9	±	0.7	6.8	4.4
2001/07/23-14:55 (144)	GCR	X	0.15	0.15	0.15	3.8	±	0.5	3.0	2.7
		Y	0.08			11.3	±	0.0	4.0	3.3
		Z	0.06			8.6	±	1.4	12.2	5.0
2001/07/23-19:54 (145)	GSR	X	0.07	0.07	0.07	15.8	±	0.7	15.2	2.7
		Y	0.06			13.7	±	0.8	14.3	13.5
		Z	0.04			14.8	±	0.3	16.1	2.9
2001/07/24-14:52 (146)	GCR	X	0.28	0.31	0.30	6.2	±	2.7	3.0	2.6
		Y	0.27			7.4	±	0.7	6.2	3.2
		Z	0.22			13.3	±	0.3	7.9	5.1
2001/07/24-19:51 (147)	GSR	X	0.10	0.15	0.14	4.7	±	0.2	3.1	3.0
		Y	0.13			8.9	±	0.6	4.4	3.2
		Z	0.06			5.0	±	0.3	12.5	4.5
2001/07/26-14:57 (—)	GCR	X	0.12	0.12	0.12	12.9	±	1.0	12.8	5.5
		Y	0.12			12.5	±	0.3	12.2	4.8
		Z	0.08			14.1	±	2.1	7.5	5.2
2001/07/26-15:07 (—)	GCR	X	0.11	0.20	0.19	7.8	±	0.2	7.6	9.2
		Y	0.19			6.6	±	0.5	4.5	3.2
		Z	0.08			12.3	±	0.7	5.3	4.9
2001/07/26-19:56 (—)	GSR	X	0.12	0.13	0.13	16.0	±	0.2	15.6	15.9
		Y	0.10			13.4	±	0.1	13.2	13.9
		Z	0.07			15.0	±	2.3	13.9	5.6
2001/07/27-10:53 (—)	GCR	X	0.28	0.31	0.31	3.3	±	0.2	3.1	2.8
		Y	0.27			6.0	±	0.5	5.3	3.1
		Z	0.13			5.3	±	0.2	5.2	5.1
2001/07/27-15:52 (—)	GSR	X	0.08	0.11	0.11	11.7	±	1.4	11.6	5.0
		Y	0.10			12.0	±	1.5	11.1	2.7
		Z	0.09			11.0	±	0.1	8.6	4.4

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2001/07/30-14:52	GCR	X	0.29		0.36	3.3	±	0.3	3.2	2.6
(—)		Y	0.29	0.36		7.9	±	3.3	3.4	3.2
		Z	0.16			6.8	±	2.2	5.4	5.1
2001/07/30-19:51	GSR	X	0.10		0.12	3.4	±	0.3	3.6	3.0
(—)		Y	0.11	0.12		8.8	±	1.0	8.5	3.1
		Z	0.07			6.2	±	0.7	11.6	4.3
2001/08/01-14:48	GCR	X	0.12		0.22	3.8	±	0.2	3.0	2.6
(148)		Y	0.21	0.22		6.5	±	0.5	5.5	3.1
		Z	0.11			13.8	±	0.2	7.6	9.3
2001/08/02-14:50	GCR	X	0.08		0.10	10.3	±	1.1	10.2	2.8
(149)		Y	0.09	0.10		13.1	±	1.4	14.3	3.1
		Z	0.08			14.3	±	2.0	6.9	5.2
2001/08/03-14:57	GCR	X	0.10		0.13	6.4	±	0.6	5.3	6.9
(150)		Y	0.12	0.14		4.3	±	1.0	4.6	3.2
		Z	0.08			7.0	±	0.7	5.8	4.9
2001/08/06-14:51	GCR	X	0.17		0.20	4.8	±	0.3	4.5	2.6
(—)		Y	0.16	0.20		7.7	±	0.6	7.4	3.2
		Z	0.09			8.1	±	1.3	6.4	11.4
2001/08/06-19:50	GSR	X	0.06		0.09	8.8	±	2.1	8.3	3.0
(—)		Y	0.08	0.09		10.8	±	1.6	8.3	3.1
		Z	0.03			11.7	±	2.2	11.4	7.5
2001/08/16-14:49	GCR	X	0.29		0.32	3.0	±	0.5	2.9	2.6
(—)		Y	0.27	0.32		3.4	±	0.2	2.9	3.2
		Z	0.10			6.1	±	2.0	7.5	3.2
2001/08/16-19:48	GSR	X	0.07		0.07	3.9	±	0.6	3.5	3.0
(—)		Y	0.07	0.08		4.0	±	0.0	3.5	3.2
		Z	0.04			6.0	±	0.0	5.0	2.9
2001/08/21-15:07	GCR	X	0.17		0.27	4.7	±	0.2	3.6	2.6
(—)		Y	0.25	0.28		4.4	±	0.2	3.5	3.2
		Z	0.20			7.1	±	0.8	5.1	4.2
2001/08/21-20:06	GSR	X	0.09		0.10	5.0	±	1.0	5.0	2.9
(—)		Y	0.07	0.11		4.9	±	0.3	4.5	3.1
		Z	0.07			5.9	±	0.5	5.4	3.8
2001/08/22-14:58	GCR	X	0.28		0.28	3.4	±	0.6	2.6	2.8
(—)		Y	0.21	0.28		5.1	±	2.4	3.2	3.1
		Z	0.17			8.7	±	0.6	9.8	5.1
2001/08/22-19:57	GSR	X	0.19		0.20	16.1	±	0.2	15.6	15.6
(—)		Y	0.15	0.20		14.7	±	0.1	14.7	15.2
		Z	0.11			17.6	±	1.5	15.2	14.6
2001/08/24-14:53	GCR	X	0.33		0.35	7.5	±	1.5	4.6	2.6
(151)		Y	0.34	0.36		8.3	±	3.2	9.1	3.2
		Z	0.16			6.8	±	2.6	5.1	5.1
2001/08/24-19:52	GSR	X	0.09		0.11	3.9	±	0.5	4.3	3.0
(152)		Y	0.11	0.13		6.7	±	1.0	8.5	3.2
		Z	0.06			14.8	±	1.2	11.9	4.3
2001/08/28-14:51	GCR	X	0.28		0.28	3.8	±	0.5	3.5	2.8
(153)		Y	0.17	0.32		5.4	±	0.7	3.8	3.1
		Z	0.19			5.0	±	0.1	4.9	5.1

Continua . . .

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2001/08/29-14:56	GCR	X	0.15		0.23	3.2	±	0.5	3.2	2.8
(154)		Y	0.22	0.23		5.0	±	0.2	4.5	3.2
		Z	0.21			9.8	±	2.7	8.3	3.2
2001/09/03-14:51	GCR	X	0.24		0.34	7.7	±	0.5	7.1	2.6
(155)		Y	0.26	0.34		6.9	±	0.8	5.6	3.0
		Z	0.16			13.3	±	0.4	7.8	8.6
2001/09/03-19:50	GSR	X	0.08		0.11	6.0	±	0.9	6.1	3.0
(156)		Y	0.11	0.12		9.2	±	0.6	8.3	3.2
		Z	0.05			9.0	±	0.7	11.6	6.7
2001/09/04-14:51	GCR	X	0.13		0.16	9.7	±	0.5	9.4	9.2
(157)		Y	0.15	0.16		8.8	±	0.8	10.2	3.1
		Z	0.10			17.5	±	1.9	17.9	8.8
2001/09/05-14:58	GCR	X	0.41		0.48	8.4	±	1.1	7.4	2.6
(158)		Y	0.44	0.48		8.8	±	2.9	3.4	3.2
		Z	0.25			8.0	±	2.2	5.6	5.1
2001/09/05-19:57	GSR	X	0.12		0.13	3.3	±	0.0	3.5	3.0
(159)		Y	0.11	0.13		4.3	±	0.0	3.5	3.1
		Z	0.07			5.1	±	0.3	9.6	4.3
2001/09/06-19:52	GSR	X	0.05		0.06	18.0	±	0.4	17.2	17.0
(160)		Y	0.06	0.06		8.7	±	1.8	12.2	3.8
		Z	0.04			19.2	±	0.7	18.5	19.7
2001/09/07-14:52	GCR	X	0.08		0.13	5.2	±	0.2	3.9	3.8
(161)		Y	0.12	0.13		4.6	±	0.1	4.3	4.5
		Z	0.05			4.9	±	0.2	4.9	4.3
2001/09/07-19:51	GSR	X	0.07		0.07	5.1	±	0.2	4.7	2.9
(162)		Y	0.06	0.07		5.4	±	0.2	5.4	4.0
		Z	0.03			6.2	±	0.6	6.0	5.8
2001/09/10-14:47	GCR	X	0.16		0.28	11.6	±	0.1	11.6	2.5
(163)		Y	0.24	0.28		7.4	±	0.5	7.1	3.0
		Z	0.18			14.8	±	0.5	10.2	11.3
2001/09/10-19:46	GSR	X	0.07		0.11	10.1	±	0.1	9.1	2.9
(164)		Y	0.11	0.12		10.9	±	0.6	11.1	3.2
		Z	0.05			10.2	±	0.7	12.2	2.9
2001/09/12-14:48	GCR	X	0.16		0.20	7.7	±	1.6	6.4	3.0
(165)		Y	0.17	0.20		6.1	±	0.9	5.4	3.1
		Z	0.09			13.2	±	0.2	15.2	3.1
2001/09/12-19:47	GSR	X	0.15		0.16	16.6	±	0.3	16.1	17.0
(166)		Y	0.11	0.16		13.5	±	0.5	13.2	3.8
		Z	0.10			20.1	±	1.4	19.2	16.8
2001/09/13-15:06	GCR	X	0.18		0.25	3.1	±	0.5	3.1	2.6
(167)		Y	0.24	0.25		3.5	±	0.0	3.4	3.2
		Z	0.08			13.7	±	2.6	11.9	3.2
2001/09/17-15:05	GCR	X	0.15		0.26	11.9	±	0.0	11.4	3.3
(168)		Y	0.26	0.27		6.0	±	0.7	4.0	3.2
		Z	0.18			19.6	±	2.4	18.5	4.2
2001/09/17-20:04	GSR	X	0.12		0.12	16.2	±	0.0	15.6	2.9
(169)		Y	0.09	0.12		14.6	±	2.6	14.3	3.2
		Z	0.06			15.2	±	2.1	17.2	3.8

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz]				
						I			B	F
2001/09/18-14:50	GCR	X	0.13			11.3	±	3.1	6.1	2.5
(170)		Y	0.16	0.17	0.17	13.7	±	0.0	15.2	3.0
		Z	0.11			12.2	±	1.4	12.2	5.1
2001/09/18-19:49	GSR	X	0.08			11.9	±	0.6	11.9	5.1
(171)		Y	0.07	0.08	0.08	9.7	±	0.3	9.3	6.8
		Z	0.04			12.3	±	1.0	11.6	6.7
2001/09/20-14:50	GCR	X	0.37			3.1	±	0.2	3.2	2.6
(172)		Y	0.46	0.51	0.51	3.8	±	0.1	3.5	3.2
		Z	0.24			16.0	±	0.5	4.4	5.1
2001/09/21-14:48	GCR	X	0.19			9.2	±	0.8	9.3	3.0
(173)		Y	0.17	0.20	0.19	5.7	±	1.8	3.6	3.1
		Z	0.12			12.7	±	0.4	5.8	5.0
2001/09/26-19:59	GSR	X	0.09			8.2	±	0.0	5.8	2.9
(174)		Y	0.09	0.13	0.13	6.8	±	0.4	4.4	3.1
		Z	0.07			6.7	±	1.6	4.4	3.9
2001/09/27-19:48	GSR	X	0.07			7.4	±	0.1	4.5	3.6
(175)		Y	0.10	0.10	0.10	7.4	±	1.6	7.4	4.0
		Z	0.06			13.7	±	2.5	13.5	4.5
2001/10/02-19:45	GSR	X	0.10			4.0	±	0.6	3.5	3.2
(176)		Y	0.09	0.11	0.11	5.5	±	0.5	5.3	3.3
		Z	0.05			10.6	±	1.1	10.6	3.9
2001/10/04-14:49	GCR	X	0.16			8.2	±	1.9	8.1	3.0
(177)		Y	0.22	0.23	0.23	6.0	±	1.5	3.6	3.1
		Z	0.14			7.0	±	1.3	4.9	5.0
2001/10/04-19:48	GSR	X	0.10			15.5	±	0.2	14.7	3.2
(178)		Y	0.12	0.13	0.13	7.6	±	0.1	5.0	3.8
		Z	0.09			6.0	±	0.4	17.2	4.4
2001/10/05-19:48	GSR	X	0.09			11.0	±	1.2	11.1	3.2
(179)		Y	0.06	0.09	0.09	12.2	±	1.6	12.2	6.1
		Z	0.03			16.6	±	4.2	20.0	5.9
2001/10/08-19:49	GSR	X	0.06			8.2	±	1.0	5.6	3.2
(180)		Y	0.05	0.06	0.06	11.4	±	0.5	11.1	4.1
		Z	0.04			9.1	±	2.1	3.8	2.9
2001/10/11-15:00	GCR	X	0.28			5.3	±	1.0	2.3	2.6
(181)		Y	0.40	0.40	0.40	7.1	±	1.3	3.4	3.2
		Z	0.16			8.5	±	1.4	4.1	5.1
2001/10/12-15:02	GCR	X	0.27			7.6	±	0.9	7.7	3.2
(182)		Y	0.21	0.33	0.33	6.0	±	0.1	5.4	3.1
		Z	0.13			6.0	±	0.9	5.6	6.8
2001/10/12-20:01	GSR	X	0.13			15.3	±	0.3	15.2	17.0
(183)		Y	0.12	0.18	0.18	12.9	±	0.7	12.5	3.8
		Z	0.11			15.7	±	0.1	14.3	6.7
2001/10/16-19:51	GSR	X	0.04			13.2	±	1.0	13.2	16.2
(184)		Y	0.07	0.07	0.07	12.3	±	0.3	12.8	3.2
		Z	0.04			12.7	±	0.9	11.1	7.0
2001/10/17-14:49	GCR	X	0.09			7.1	±	2.1	2.5	2.6
(185)		Y	0.14	0.15	0.15	3.9	±	0.5	3.4	3.2
		Z	0.07			8.5	±	0.7	4.3	3.2

Continua ...

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2001/10/18-14:52	GCR	X	0.14			9.3	±	1.7	9.8	3.1
(186)		Y	0.27	0.27	0.27	6.0	±	0.3	6.6	3.2
		Z	0.21			13.5	±	1.9	13.9	4.2
2001/10/18-19:51	GSR	X	0.09			16.2	±	0.9	15.6	17.0
(187)		Y	0.10	0.11	0.10	12.8	±	0.3	12.2	4.3
		Z	0.05			18.7	±	0.3	16.1	3.8
2001/10/22-14:51	GCR	X	0.16			9.4	±	1.6	8.3	2.6
(—)		Y	0.27	0.28	0.27	6.2	±	0.8	3.8	3.2
		Z	0.14			12.9	±	0.1	3.6	4.4
2001/10/22-19:50	GSR	X	0.07			10.3	±	3.2	11.1	2.9
(—)		Y	0.10	0.12	0.11	8.5	±	1.1	9.8	11.8
		Z	0.06			16.1	±	1.4	15.2	3.9
2001/10/24-10:52	GCR	X	0.11			9.3	±	0.0	7.9	2.8
(188)		Y	0.19	0.19	0.19	7.3	±	0.8	3.8	3.1
		Z	0.08			6.7	±	2.0	6.2	5.1
2001/10/25-14:50	GCR	X	0.22			5.2	±	0.0	3.7	2.6
(189)		Y	0.25	0.28	0.27	3.9	±	0.1	3.4	3.2
		Z	0.11			12.8	±	2.9	12.5	3.2
2001/10/29-14:53	GCR	X	0.16			4.2	±	0.4	3.3	2.6
(190)		Y	0.18	0.20	0.19	7.8	±	1.7	8.1	3.2
		Z	0.13			15.7	±	0.8	5.1	5.1
2001/10/30-11:21	GCR	X	0.16			8.2	±	0.5	8.3	7.1
(191)		Y	0.19	0.22	0.22	7.6	±	0.8	7.5	3.0
		Z	0.12			16.7	±	0.1	17.9	5.1
2001/10/31-14:49	GCR	X	0.12			11.4	±	0.7	11.1	2.8
(192)		Y	0.13	0.17	0.16	10.8	±	1.2	15.2	3.1
		Z	0.08			16.5	±	0.8	15.6	3.4
2001/10/31-19:48	GSR	X	0.11			15.6	±	0.5	15.2	17.0
(193)		Y	0.13	0.17	0.17	14.1	±	0.1	14.7	3.8
		Z	0.09			16.7	±	2.3	16.1	14.0
2001/11/02-19:51	GSR	X	0.04			14.7	±	0.1	14.7	16.7
(194)		Y	0.04	0.04	0.04	13.2	±	1.6	13.2	17.0
		Z	0.02			16.9	±	1.2	13.5	14.2
2001/11/06-14:49	GCR	X	0.09			7.2	±	0.9	4.4	3.0
(195)		Y	0.10	0.11	0.10	4.7	±	1.5	4.1	3.2
		Z	0.09			12.4	±	1.0	5.8	3.2
2001/11/06-19:48	GSR	X	0.06			10.7	±	0.4	10.6	17.5
(196)		Y	0.05	0.06	0.06	12.3	±	0.1	11.9	7.3
		Z	0.05			15.1	±	3.3	15.2	18.9
2001/11/07-19:52	GSR	X	0.05			10.9	±	1.0	10.9	5.1
(197)		Y	0.09	0.09	0.09	13.6	±	0.2	14.7	15.7
		Z	0.04			16.6	±	2.0	14.7	15.3
2001/11/08-19:49	GSR	X	0.08			12.5	±	1.1	13.2	3.2
(198)		Y	0.06	0.08	0.08	15.0	±	1.1	15.6	14.7
		Z	0.04			19.5	±	2.8	17.9	15.0
2001/11/09-14:55	GCR	X	0.53			4.7	±	0.0	2.8	2.6
(199)		Y	0.42	0.54	0.54	5.3	±	0.1	4.6	2.7
		Z	0.24			9.6	±	0.3	9.8	5.2

Continua . . .

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz]				
							I		B	F
2001/11/09-19:54	GSR	X	0.13		0.17	6.0	±	1.3	6.0	3.2
(200)		Y	0.14	0.17		8.2	±	0.8	9.4	3.3
		Z	0.13			10.6	±	0.8	9.1	7.0
2001/11/13-14:51	GCR	X	0.13		0.14	6.4	±	2.7	2.5	2.6
(—)		Y	0.14	0.15		3.7	±	0.2	3.7	3.2
		Z	0.11			14.0	±	0.6	13.9	4.9
2001/11/13-19:50	GSR	X	0.04		0.07	14.8	±	0.2	14.7	3.2
(—)		Y	0.06	0.07		10.3	±	0.5	7.4	3.7
		Z	0.04			15.4	±	1.6	18.5	3.9
2001/11/15-19:51	GSR	X	0.04		0.07	11.0	±	2.2	10.9	3.2
(201)		Y	0.05	0.07		12.4	±	1.9	12.2	11.3
		Z	0.04			16.1	±	0.3	14.3	13.5
2001/11/16-14:47	GCR	X	0.14		0.20	9.6	±	0.7	8.1	2.6
(202)		Y	0.20	0.21		5.5	±	0.1	3.6	3.2
		Z	0.14			13.0	±	0.9	5.5	4.4
2001/11/16-19:46	GSR	X	0.07		0.10	11.2	±	2.6	11.6	3.2
(203)		Y	0.08	0.10		9.6	±	1.9	6.1	5.5
		Z	0.05			13.0	±	1.7	10.9	6.4
2001/11/19-14:56	GCR	X	0.12		0.24	9.4	±	0.6	9.4	3.1
(—)		Y	0.24	0.24		7.0	±	0.8	4.2	3.2
		Z	0.16			13.6	±	1.3	15.6	4.9
2001/11/19-19:55	GSR	X	0.06		0.07	15.4	±	1.4	15.6	2.9
(—)		Y	0.07	0.08		12.7	±	1.1	11.9	5.2
		Z	0.04			10.1	±	2.4	5.5	6.8
2001/11/20-14:56	GCR	X	0.09		0.13	8.7	±	1.4	7.9	2.8
(204)		Y	0.13	0.13		5.4	±	0.2	4.4	3.1
		Z	0.07			17.9	±	0.3	20.0	3.2
2001/11/21-14:52	GCR	X	0.15		0.20	7.7	±	1.1	8.3	2.9
(205)		Y	0.15	0.20		6.8	±	2.0	4.6	3.1
		Z	0.13			6.2	±	1.3	4.2	4.5
2001/11/21-19:51	GSR	X	0.08		0.11	11.5	±	0.5	10.9	3.2
(206)		Y	0.10	0.12		10.7	±	1.1	10.6	3.8
		Z	0.08			17.4	±	1.2	16.7	5.0
2001/11/26-14:56	GCR	X	0.15		0.20	9.6	±	1.7	6.8	2.5
(—)		Y	0.18	0.20		7.3	±	0.3	5.1	3.0
		Z	0.13			8.9	±	0.6	7.8	8.7
2001/11/26-19:55	GSR	X	0.07		0.08	12.9	±	1.1	12.5	16.2
(—)		Y	0.06	0.08		12.3	±	1.1	11.9	16.2
		Z	0.06			14.0	±	0.2	14.3	6.9
2001/11/27-19:51	GSR	X	0.05		0.05	17.6	±	1.1	17.2	17.7
(207)		Y	0.03	0.06		11.5	±	1.4	13.2	13.4
		Z	0.04			18.7	±	0.7	17.9	13.7
2001/11/28-14:53	GCR	X	0.07		0.10	5.2	±	0.4	3.2	2.8
(208)		Y	0.10	0.11		7.3	±	1.9	3.0	3.1
		Z	0.06			12.1	±	0.1	19.2	4.9
2001/11/30-14:50	GCR	X	0.26		0.35	8.1	±	1.9	7.9	2.6
(209)		Y	0.29	0.36		3.7	±	0.4	3.4	3.2
		Z	0.15			6.6	±	0.6	4.5	3.2

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2001/11/30-19:49	GSR	X	0.05		0.06	4.6	±	0.6	4.0	3.0
(210)		Y	0.05	0.06		7.3	±	1.7	6.0	3.3
		Z	0.03			9.3	±	2.1	10.0	4.3
2001/12/05-14:50	GCR	X	0.13		0.18	7.9	±	0.9	7.9	2.8
(—)		Y	0.16	0.18		7.8	±	0.2	3.7	3.1
		Z	0.07			8.5	±	1.7	6.8	3.2
2001/12/06-14:48	GCR	X	0.24		0.24	7.3	±	0.9	7.6	2.9
(—)		Y	0.19	0.24		6.5	±	0.5	5.8	3.1
		Z	0.12			7.2	±	3.0	3.9	6.9
2001/12/06-19:47	GSR	X	0.08		0.11	15.4	±	0.7	15.2	3.2
(—)		Y	0.09	0.13		13.2	±	1.2	12.2	8.3
		Z	0.09			14.7	±	0.2	16.7	6.7
2001/12/07-14:59	GCR	X	0.13		0.21	10.2	±	0.0	10.2	3.1
(—)		Y	0.20	0.21		7.0	±	1.7	4.1	3.2
		Z	0.13			17.0	±	2.8	16.7	3.2
2001/12/10-14:52	GCR	X	0.10		0.16	4.2	±	0.4	3.6	2.6
(—)		Y	0.16	0.17		6.5	±	2.4	3.5	3.0
		Z	0.08			13.6	±	0.2	4.4	4.3
2002/01/28-14:54	GCR	X	0.11		0.14	3.9	±	0.2	3.4	2.6
(—)		Y	0.13	0.14		7.2	±	1.5	4.0	3.2
		Z	0.06			5.8	±	0.8	4.7	4.9
2002/01/31-10:50	GCR	X	0.17		0.31	11.4	±	2.0	11.6	3.7
(—)		Y	0.30	0.31		7.3	±	0.1	12.5	3.2
		Z	0.21			13.4	±	1.9	5.5	4.8
2002/01/31-15:50	GSR	X	0.14		0.15	15.4	±	0.3	15.2	16.9
(—)		Y	0.14	0.15		12.5	±	1.2	11.9	6.5
		Z	0.11			15.4	±	1.2	15.6	5.7
2002/01/31-19:54	GSR	X	0.06		0.09	9.9	±	2.2	9.8	3.2
(—)		Y	0.09	0.09		12.2	±	1.1	11.9	10.1
		Z	0.05			15.5	±	1.9	10.6	12.0
2002/02/01-15:02	GCR	X	0.19		0.21	7.1	±	1.8	4.5	2.6
(211)		Y	0.14	0.21		8.0	±	1.4	4.7	2.8
		Z	0.12			18.2	±	0.8	21.7	4.6
2002/02/01-18:00	GCR	X	0.10		0.13	6.5	±	1.3	5.4	2.6
(212)		Y	0.11	0.13		5.7	±	0.0	5.8	4.8
		Z	0.07			13.1	±	0.4	6.8	4.7
2002/02/05-14:51	GCR	X	0.24		0.24	6.9	±	0.1	6.3	2.8
(213)		Y	0.17	0.24		6.7	±	2.1	5.6	3.1
		Z	0.13			7.1	±	0.4	5.7	5.1
2002/02/05-19:51	GSR	X	0.08		0.09	8.8	±	1.0	8.6	6.7
(214)		Y	0.07	0.09		8.9	±	2.1	5.7	8.3
		Z	0.06			16.2	±	0.5	15.2	6.8
2002/02/06-14:54	GCR	X	0.17		0.25	4.2	±	0.2	3.2	2.5
(215)		Y	0.25	0.25		8.4	±	2.1	8.3	3.1
		Z	0.13			8.9	±	1.1	5.0	4.5
2002/02/11-14:48	GCR	X	0.12		0.14	3.9	±	0.1	3.1	2.9
(216)		Y	0.11	0.14		5.0	±	1.0	3.6	3.1
		Z	0.07			7.1	±	1.3	5.0	4.6

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora	Estación	Comp.	Valor	Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I	±	Error	B	F
2002/02/12-14:59	GCR	X	0.38			3.6	±	1.0	3.5	2.7
(217)		Y	0.59	0.63	0.61	8.5	±	2.5	8.8	3.2
		Z	0.31			5.4	±	0.1	4.5	5.1
2002/02/14-14:49	GCR	X	0.37			6.7	±	0.7	6.4	2.6
(—)		Y	0.34	0.42	0.40	9.2	±	0.1	11.9	3.2
		Z	0.23			8.5	±	0.4	8.8	8.8
2002/02/15-10:58	GCR	X	0.11			7.2	±	0.2	3.6	2.7
(218)		Y	0.15	0.15	0.15	10.1	±	0.9	9.6	3.2
		Z	0.04			9.1	±	0.7	5.8	3.2
2002/02/18-17:53	GCR	X	0.22			7.8	±	1.2	7.7	6.8
(219)		Y	0.22	0.24	0.23	6.8	±	0.6	7.2	3.2
		Z	0.14			7.2	±	0.3	7.2	4.4
2002/02/18-22:53	GSR	X	0.06			9.1	±	0.6	4.8	2.9
(220)		Y	0.07	0.08	0.07	8.4	±	1.0	8.8	6.6
		Z	0.05			9.7	±	2.1	5.7	6.9
2002/02/21-14:51	GCR	X	0.14			5.8	±	0.3	5.2	2.9
(221)		Y	0.11	0.15	0.14	8.6	±	0.8	5.4	3.4
		Z	0.10			7.5	±	1.0	6.0	4.6
2002/02/21-19:51	GSR	X	0.05			11.6	±	0.9	11.6	3.2
(222)		Y	0.07	0.08	0.08	10.0	±	1.3	9.8	14.5
		Z	0.05			13.3	±	0.1	13.2	13.1
2002/02/25-11:02	GCR	X	0.21			11.2	±	0.4	10.6	2.5
(—)		Y	0.33	0.33	0.33	10.7	±	1.2	6.8	3.2
		Z	0.18			8.5	±	2.0	6.8	4.5
2002/02/25-14:49	GCR	X	0.11			6.5	±	0.5	3.3	2.5
(—)		Y	0.07	0.13	0.13	8.2	±	2.4	3.4	3.2
		Z	0.05			9.4	±	2.8	15.6	5.0
2002/02/25-16:02	GSR	X	0.15			15.8	±	0.2	15.6	16.2
(—)		Y	0.09	0.16	0.15	12.7	±	0.7	12.8	14.1
		Z	0.09			17.0	±	0.7	15.6	16.2
2002/02/26-11:06	GCR	X	0.07			5.4	±	1.0	3.9	3.8
(—)		Y	0.07	0.09	0.09	6.7	±	1.8	3.3	3.1
		Z	0.04			8.6	±	2.8	7.4	5.0
2002/02/26-14:49	GCR	X	0.16			9.1	±	2.0	9.4	2.6
(—)		Y	0.30	0.31	0.31	7.6	±	0.6	3.5	3.0
		Z	0.14			7.5	±	0.3	7.1	4.5
2002/02/26-16:06	GSR	X	0.13			13.6	±	2.9	9.3	3.7
(—)		Y	0.12	0.14	0.14	7.7	±	0.1	6.5	3.6
		Z	0.08			16.9	±	3.7	9.8	4.7
2002/02/26-19:49	GSR	X	0.05			8.3	±	0.2	4.4	3.2
(—)		Y	0.07	0.07	0.07	9.3	±	1.6	8.9	3.2
		Z	0.05			30.6	±	2.7	27.8	3.8
2002/02/27-14:56	GCR	X	0.19			10.1	±	0.6	10.0	2.7
(—)		Y	0.34	0.39	0.38	9.8	±	1.7	3.3	3.2
		Z	0.20			7.7	±	0.6	5.0	5.0
2002/03/01-14:50	GCR	X	0.24			3.5	±	0.3	3.2	2.6
(—)		Y	0.19	0.29	0.28	6.3	±	1.2	3.3	3.3
		Z	0.16			17.7	±	2.4	15.6	4.6

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2002/03/01-19:50	GSR	X	0.06		0.07	6.7	±	0.7	4.4	3.2
(—)		Y	0.07	0.07		5.5	±	1.3	6.0	3.1
		Z	0.03			8.5	±	3.4	5.2	4.5
2002/03/05-10:54	GCR	X	0.14		0.14	3.3	±	0.7	3.0	2.9
(223)		Y	0.11	0.15		4.2	±	0.7	3.7	3.1
		Z	0.09			5.8	±	1.3	4.9	4.5
2002/03/05-15:54	GSR	X	0.05		0.09	6.2	±	0.3	6.2	6.7
(224)		Y	0.09	0.09		8.9	±	0.1	5.3	5.9
		Z	0.03			15.5	±	1.7	9.8	6.7
2002/03/06-10:54	GCR	X	0.06		0.08	9.2	±	0.3	7.6	3.2
(—)		Y	0.07	0.11		6.3	±	0.9	4.0	3.1
		Z	0.10			19.3	±	1.1	18.5	5.1
2002/03/06-14:57	GCR	X	0.15		0.17	4.8	±	0.4	2.4	2.5
(—)		Y	0.15	0.17		4.1	±	0.6	3.3	3.2
		Z	0.09			8.0	±	0.7	6.4	4.9
2002/03/07-14:48	GCR	X	0.30		0.37	5.2	±	0.1	4.9	2.8
(225)		Y	0.30	0.38		4.5	±	0.1	5.0	3.2
		Z	0.19			5.5	±	0.3	4.9	4.9
2002/03/07-19:48	GSR	X	0.12		0.15	6.8	±	0.4	6.8	5.1
(226)		Y	0.11	0.15		6.0	±	1.2	9.8	6.7
		Z	0.08			8.6	±	0.5	8.3	7.0
2002/03/08-14:50	GCR	X	0.33		0.37	4.6	±	0.2	6.0	2.6
(—)		Y	0.23	0.38		6.6	±	1.3	3.4	2.8
		Z	0.18			10.1	±	0.3	10.4	4.7
2002/03/08-19:50	GSR	X	0.07		0.07	7.1	±	0.6	6.0	3.2
(—)		Y	0.05	0.07		9.0	±	2.2	5.1	3.2
		Z	0.04			11.3	±	1.5	6.1	8.5
2002/03/12-19:57	GSR	X	0.06		0.06	15.6	±	0.1	15.2	5.2
(227)		Y	0.03	0.06		13.9	±	1.0	11.4	4.8
		Z	0.03			10.9	±	3.2	5.8	5.8
2002/03/13-14:59	GCR	X	0.28		0.30	5.6	±	0.8	5.7	2.6
(—)		Y	0.20	0.30		7.7	±	1.4	3.3	3.2
		Z	0.21			14.6	±	0.0	13.5	4.7
2002/03/13-19:59	GSR	X	0.06		0.10	4.6	±	0.6	4.1	3.2
(—)		Y	0.10	0.10		5.4	±	0.7	7.1	3.1
		Z	0.04			12.5	±	0.0	14.7	4.5
2002/03/16-19:46	GSR	X	0.03		0.05	11.5	±	1.6	10.4	12.1
(—)		Y	0.05	0.05		10.3	±	0.5	9.6	10.4
		Z	0.02			8.7	±	0.2	8.5	6.8
2002/03/18-14:50	GCR	X	0.18		0.25	5.9	±	0.8	4.3	2.6
(228)		Y	0.23	0.25		7.2	±	1.5	8.8	4.5
		Z	0.17			13.3	±	0.8	6.3	4.4
2002/03/18-19:50	GSR	X	0.09		0.10	11.6	±	0.5	11.4	16.3
(229)		Y	0.09	0.10		12.5	±	2.5	12.5	5.5
		Z	0.07			15.5	±	0.9	14.3	12.8
2002/03/19-14:49	GCR	X	0.08		0.10	9.9	±	1.2	9.4	3.0
(—)		Y	0.09	0.10		11.3	±	1.2	11.6	12.3
		Z	0.06			18.3	±	0.8	21.7	4.9

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2002/03/21-15:09	GCR	X	0.21		0.22	5.4	±	0.8	2.9	2.6
(—)		Y	0.15	0.22		6.9	±	0.4	4.7	2.7
		Z	0.10			16.2	±	0.7	15.6	5.1
2002/03/22-14:49	GCR	X	0.30		0.34	5.2	±	0.3	3.2	2.6
(230)		Y	0.29	0.35		9.5	±	1.7	9.6	3.2
		Z	0.17			13.1	±	0.9	4.1	4.6
2002/03/22-19:49	GSR	X	0.06		0.11	5.3	±	0.2	3.5	3.2
(231)		Y	0.11	0.11		6.8	±	0.2	5.8	3.1
		Z	0.05			11.3	±	1.2	9.4	4.5
2002/03/26-14:54	GCR	X	0.18		0.23	5.9	±	0.2	3.4	2.6
(—)		Y	0.22	0.24		12.3	±	0.1	8.6	3.2
		Z	0.11			9.5	±	0.8	4.8	4.9
2002/03/27-14:54	GCR	X	0.54		0.56	6.2	±	1.5	5.9	2.5
(232)		Y	0.43	0.56		6.8	±	1.1	6.4	3.2
		Z	0.29			8.0	±	1.4	7.7	8.8
2002/03/27-19:54	GSR	X	0.14		0.15	9.4	±	0.2	9.3	3.2
(233)		Y	0.15	0.15		11.2	±	0.3	11.1	6.7
		Z	0.08			9.7	±	0.4	10.2	7.5
2002/04/01-14:50	GCR	X	0.19		0.20	5.8	±	0.5	5.7	2.7
(234)		Y	0.14	0.20		7.9	±	0.7	6.9	7.1
		Z	0.11			6.1	±	1.1	6.0	4.9
2002/04/01-19:50	GSR	X	0.05		0.08	7.4	±	0.9	6.2	6.7
(235)		Y	0.07	0.08		9.7	±	1.3	9.3	5.9
		Z	0.03			8.0	±	1.1	10.4	6.8
2002/04/03-14:46	GCR	X	0.09		0.12	9.8	±	0.3	9.3	2.8
(236)		Y	0.12	0.12		5.0	±	0.4	5.8	3.0
		Z	0.07			7.1	±	0.4	13.5	5.1
2002/05/22-10:58	GCR	X	0.23		0.28	5.7	±	0.1	6.6	2.6
(—)		Y	0.21	0.28		6.9	±	0.5	5.7	3.2
		Z	0.17			8.5	±	1.2	7.9	8.8
2002/05/24-10:58	GCR	X	0.32		0.36	5.6	±	0.2	2.6	2.6
(—)		Y	0.28	0.36		4.4	±	1.9	3.7	2.8
		Z	0.21			5.5	±	0.1	17.9	4.8
2002/05/27-14:46	GCR	X	0.08		0.10	5.4	±	0.4	3.3	3.0
(237)		Y	0.08	0.10		5.2	±	1.9	3.2	3.1
		Z	0.05			5.5	±	0.5	4.2	3.2
2002/06/05-11:01	GCR	X	0.21		0.26	3.9	±	0.1	3.0	2.6
(—)		Y	0.22	0.26		5.4	±	0.6	4.1	2.8
		Z	0.16			17.2	±	1.4	16.7	4.8
2002/06/05-14:54	GCR	X	0.24		0.25	5.8	±	0.5	3.6	3.0
(—)		Y	0.21	0.25		3.7	±	0.0	2.8	3.2
		Z	0.14			11.3	±	0.2	7.6	4.3
2002/06/07-14:53	GCR	X	0.33		0.44	6.3	±	2.2	5.1	2.6
(—)		Y	0.42	0.45		8.4	±	0.5	6.9	2.7
		Z	0.20			10.4	±	0.4	9.4	5.1
2002/06/14-14:53	GCR	X	0.17		0.26	7.4	±	1.2	4.8	2.8
(238)		Y	0.21	0.26		12.8	±	0.8	4.7	3.1
		Z	0.09			9.9	±	1.5	4.8	3.2

Continua . . .

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2002/06/14-19:53	GSR	X	0.04			15.6	±	1.4	14.7	3.7
(239)		Y	0.10	0.10	0.10	11.3	±	0.1	11.4	7.3
		Z	0.03			12.9	±	1.1	16.1	7.1
2002/06/19-14:52	GCR	X	0.32			3.5	±	0.2	3.5	2.6
(240)		Y	0.30	0.34	0.34	5.2	±	0.2	5.1	2.7
		Z	0.16			13.6	±	0.0	5.2	5.1
2002/06/19-19:53	GSR	X	0.16			10.2	±	1.5	10.0	3.2
(241)		Y	0.09	0.17	0.16	9.7	±	2.8	9.8	3.2
		Z	0.06			14.5	±	0.8	14.3	5.7
2002/06/27-14:48	GCR	X	0.28			6.6	±	2.0	6.9	2.6
(—)		Y	0.30	0.35	0.35	11.3	±	1.1	4.7	3.2
		Z	0.17			14.7	±	0.1	18.5	5.2
2002/06/27-19:49	GSR	X	0.06			9.1	±	0.6	9.3	3.1
(—)		Y	0.07	0.08	0.08	10.8	±	2.1	5.0	3.1
		Z	0.05			13.0	±	1.5	4.4	6.7
2002/06/28-19:48	GSR	X	0.14			10.0	±	0.2	9.8	4.9
(—)		Y	0.12	0.16	0.16	13.2	±	1.3	12.8	5.4
		Z	0.10			14.0	±	0.3	13.9	4.5
2002/07/04-19:51	GSR	X	0.11			9.4	±	0.2	9.1	16.1
(242)		Y	0.16	0.19	0.18	9.9	±	0.3	9.3	7.8
		Z	0.07			14.0	±	0.7	14.7	7.9
2002/07/08-19:58	GSR	X	0.08			11.5	±	0.0	11.6	3.1
(243)		Y	0.05	0.08	0.08	14.1	±	0.9	14.3	7.3
		Z	0.04			19.8	±	1.5	19.2	5.7
2002/07/09-19:58	GSR	X	0.07			7.8	±	0.9	7.5	7.7
(244)		Y	0.09	0.10	0.10	11.5	±	1.4	11.1	8.0
		Z	0.05			8.1	±	0.3	7.6	6.7
2002/07/11-19:50	GSR	X	0.11			13.1	±	0.3	13.2	3.2
(245)		Y	0.09	0.11	0.11	12.1	±	0.8	12.5	3.2
		Z	0.06			15.1	±	2.8	14.3	7.0
2002/07/12-19:54	GSR	X	0.07			5.6	±	0.7	5.5	3.2
(—)		Y	0.11	0.11	0.11	6.4	±	1.5	7.0	3.1
		Z	0.07			12.2	±	0.5	8.2	5.7
2002/07/17-14:59	GCR	X	0.47			9.6	±	1.3	9.6	2.6
(—)		Y	0.41	0.54	0.54	7.7	±	0.2	11.4	3.2
		Z	0.20			15.0	±	0.1	8.5	5.1
2002/07/17-20:00	GSR	X	0.07			8.6	±	1.2	8.3	3.1
(—)		Y	0.07	0.09	0.09	8.8	±	0.3	8.9	11.1
		Z	0.07			13.5	±	1.8	11.6	6.7
2002/07/23-19:49	GSR	X	0.06			8.5	±	1.4	6.1	3.4
(246)		Y	0.04	0.08	0.07	10.6	±	1.3	11.4	2.8
		Z	0.03			9.6	±	2.7	5.5	4.4
2002/07/25-14:49	GCR	X	0.42			6.4	±	0.2	6.1	2.6
(247)		Y	0.40	0.48	0.48	6.7	±	0.2	10.6	3.2
		Z	0.27			12.6	±	0.3	8.8	4.5
2002/07/25-19:50	GSR	X	0.10			9.8	±	0.1	9.8	3.2
(248)		Y	0.13	0.14	0.14	8.2	±	1.5	10.2	3.2
		Z	0.11			13.1	±	0.4	10.0	9.2

Continua . . .

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I	±		B	F
2002/07/29-10:58	GCR	X	0.10			6.7	±	1.0	7.0	2.6
(—)		Y	0.08	0.10	0.10	7.3	±	0.5	6.1	3.2
		Z	0.05			11.6	±	2.6	5.2	5.0
2002/07/29-14:50	GCR	X	0.19			4.6	±	0.8	3.8	2.5
(—)		Y	0.20	0.23	0.21	9.7	±	1.6	10.0	3.2
		Z	0.14			4.8	±	0.6	4.5	4.1
2002/07/29-19:51	GSR	X	0.07			9.7	±	0.2	9.3	3.2
(—)		Y	0.08	0.09	0.08	12.5	±	1.4	12.2	7.8
		Z	0.05			11.4	±	0.9	9.1	7.0
2002/07/30-19:54	GSR	X	0.05			6.3	±	1.4	2.8	3.4
(249)		Y	0.03	0.06	0.06	10.8	±	2.3	3.8	3.8
		Z	0.03			14.5	±	1.4	11.4	5.7
2002/07/31-11:04	GCR	X	0.13			7.3	±	1.0	6.3	3.1
(—)		Y	0.14	0.15	0.15	4.4	±	0.4	4.0	3.1
		Z	0.10			6.9	±	2.0	4.9	4.9
2002/07/31-15:07	GCR	X	0.16			4.4	±	0.2	4.5	2.8
(—)		Y	0.24	0.25	0.25	5.3	±	1.2	3.5	3.2
		Z	0.10			5.5	±	1.3	4.1	3.2
2002/07/31-20:08	GSR	X	0.06			5.6	±	1.0	3.8	3.8
(—)		Y	0.06	0.09	0.09	4.4	±	0.3	3.8	3.0
		Z	0.06			15.5	±	0.7	8.2	3.8
2002/08/01-14:54	GCR	X	0.08			10.3	±	0.3	8.6	2.8
(—)		Y	0.10	0.10	0.10	6.7	±	0.5	6.2	3.2
		Z	0.04			13.7	±	3.6	5.0	3.2
2002/08/06-14:48	GCR	X	0.10			5.9	±	0.8	3.4	2.6
(250)		Y	0.14	0.15	0.15	6.2	±	1.0	5.4	3.0
		Z	0.06			7.4	±	0.3	7.9	9.1
2002/08/09-19:50	GSR	X	0.05			7.9	±	0.7	6.8	3.4
(251)		Y	0.05	0.06	0.06	9.1	±	1.8	9.1	6.0
		Z	0.05			12.2	±	1.4	11.1	5.9
2002/08/12-14:53	GCR	X	0.09			5.6	±	2.1	3.5	2.5
(252)		Y	0.10	0.10	0.10	4.9	±	1.1	3.1	3.2
		Z	0.06			7.4	±	0.1	3.9	5.0
2002/08/13-14:56	GCR	X	0.34			3.3	±	0.1	3.2	2.6
(253)		Y	0.31	0.39	0.39	4.3	±	0.1	4.4	2.8
		Z	0.19			15.3	±	1.3	18.5	4.7
2002/08/13-19:58	GSR	X	0.12			11.9	±	2.9	12.5	3.2
(254)		Y	0.13	0.15	0.14	9.5	±	0.9	10.9	3.2
		Z	0.06			12.0	±	2.8	10.9	4.5
2002/08/15-14:56	GCR	X	0.46			6.1	±	1.5	5.3	2.6
(255)		Y	0.46	0.66	0.65	6.7	±	0.4	5.3	3.2
		Z	0.23			5.5	±	1.4	5.3	4.8
2002/08/19-20:07	GCR	X	0.06			7.4	±	1.4	7.6	7.5
(—)		Y	0.08	0.09	0.08	7.8	±	0.4	7.6	7.3
		Z	0.04			10.0	±	1.2	7.0	6.9
2002/08/20-15:11	GCR	X	0.07			10.3	±	2.8	10.0	2.5
(—)		Y	0.09	0.09	0.09	13.2	±	0.7	14.3	15.6
		Z	0.06			15.2	±	0.2	15.6	9.3

Continua ...

Continuación tabla F.1 Parámetros de voladuras

Fecha-Hora		Comp.		Velocidad [mm/s]		Frecuencia [Hz] I			B	F
2002/08/20-20:00	GSR	X	0.07		0.08	9.1	±	0.4	8.9	7.1
(—)		Y	0.07	0.09		8.4	±	0.7	7.4	7.1
		Z	0.03			8.7	±	1.0	11.6	6.0
2002/08/21-14:52	GCR	X	0.10		0.15	7.5	±	0.9	7.9	6.9
(256)		Y	0.14	0.15		8.8	±	3.1	9.6	6.2
		Z	0.08			8.7	±	1.2	6.5	5.2
2002/08/26-14:52	GCR	X	0.13		0.16	6.4	±	1.6	6.9	2.6
(257)		Y	0.15	0.16		9.1	±	1.2	7.7	4.6
		Z	0.11			10.9	±	2.0	7.6	4.4
2002/08/27-19:56	GSR	X	0.04		0.06	12.6	±	3.6	9.6	3.4
(258)		Y	0.06	0.06		11.0	±	0.6	10.9	3.4
		Z	0.04			16.8	±	0.6	16.1	13.5
2002/08/28-14:52	GCR	X	0.12		0.14	10.8	±	2.2	10.2	2.6
(—)		Y	0.13	0.14		9.2	±	0.9	6.6	3.0
		Z	0.10			17.9	±	1.3	16.7	4.7
2002/08/28-19:53	GSR	X	0.03		0.06	13.8	±	1.3	13.9	5.0
(—)		Y	0.06	0.06		11.3	±	0.6	11.1	6.2
		Z	0.03			12.0	±	0.9	11.9	6.7
2002/08/29-14:54	GCR	X	0.17		0.17	7.6	±	0.4	6.9	2.8
(259)		Y	0.12	0.17		10.8	±	3.3	5.2	3.1
		Z	0.11			14.9	±	0.6	4.9	5.2
2002/08/29-19:55	GSR	X	0.07		0.07	12.6	±	1.9	12.8	5.3
(260)		Y	0.07	0.07		11.9	±	1.0	11.1	7.3
		Z	0.05			13.6	±	0.5	12.2	7.0